

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"
Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____



«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ С.М.Пересада
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

спеціалізація – електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(назва)

на тему: Автоматизація системи вентиляції з підвищеними показниками енергоефективності

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕП-91мп
(шифр групи)

Вошкулат Олександр Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник д.т.н, доцент, Ковбаса Сергій Миколайович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Спеціалізація – електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ С.М.Пересада
(підпис) (ініціали, прізвище)
« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Вошкулат Олександр Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: «Електромеханічна система малогабаритного електромобіля»

науковий керівник дисертації Ковбаса Сергій Миколайович, д.т.н, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2020 р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації 15.12.2020 р.

3. Об'єкт дослідження: процеси керування координатами приводних двигунів електричних транспортних засобів.

4. Предмет дослідження: електромеханічна система малогабаритного електромобіля.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Аналітичний огляд, Розрахунок та вибір двигуна для електромеханічної системи, Розробка шасі малогабаритного

електромобіля, Розробка системи керування та автоматизації, Написання стартап-проекту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: Схема електрична підключення контролера; Схема електрична принципова; Креслення загального вигляду малогабаритного електромобіля; Фото малогабаритного електромобіля; Функціональна схема електроприводу постійного струму; Графіки перехідних процесів.

7. Орієнтовний перелік публікацій: «Програмна фільтрація швидкості при вимірюванні її за допомогою енкодера»; «Концепція електромеханічної системи дровоколу»; «Малогабаритний електромобіль для експериментальних досліджень електромеханічних систем».

8. Консультанти розділів дисертації*

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

9. Дата видачі завдання 1.09.2020 р.

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|---|--|----------|
| 1 | Аналітичний огляд | 20.10.2020 | |
| 2 | Розрахунок та вибір двигуна для електромеханічної системи | 10.11.2020 | |
| 3 | Розробка шасі малогабаритного електромобіля | 15.11.2020 | |
| 4 | Результати системи керування та автоматизації | 20.11.2020 | |
| 6 | Написання стартап-проекту | 15.11.2020 | |
| 7 | | | |

Студент


(підпис)

Вошкулат О.І.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації


(підпис)

Ковбаса С. М.
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.



РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: сторінок – 117, рисунків – 59, таблиць – 38, та графічну частину на 6 листах. Структура дипломного проекту включає наступні розділи:

1. Аналітичний огляд ;
2. Розрахунок та вибір двигуна для електромеханічної системи;
3. Розробка шасі малогабаритного електромобіля;
4. Результати системи керування та автоматизації;
5. Написання стартап-проекту.

Мета роботи полягає в розробці та створенні реальної моделі електромеханічної системи малогабаритного електромобіля.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА, МАЛОГАБАРИТНИЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ, СИСТЕМА, ШІМ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ, КОНТРОЛЕР, МОМЕНТ, ПРИСКОРЕННЯ, ШВИДКІСТЬ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЕКСПЕРЕМЕНТ, ДОСЛІДЖЕННЯ.

| | | | | | | | | |
|-----------|--------------|----------|---|------|--|---|------|---------|
| | | | | | 141.61203.021.МД | | | |
| Змн. | Лист | № докум. | Підпис | Дата | Електротехнічна система малогабаритного електромобіля Реферат | Літ. | Арк. | Аркушів |
| Розроб. | Вошкулат | |  | | | | 4 | 117 |
| Перевір. | Ковбаса С.М. | |  | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | НТУУ «КПІ», ФЕА Кафедра АЕМС-ЕП Гр. ЕП-91мп | | |
| Затверд. | Пересада | | | | | | | |



SUMMARY

The master's dissertation contains: pages - 117, figures - 59, tables - 38, and a graphic part on 6 sheets. The structure of the diploma project includes the following sections:

1. Analytical review;
2. Calculation and selection of the engine for the electromechanical system;
3. Development of the chassis of a small electric car;
4. Results of control and automation system;
5. Writing a startup project.

The purpose of the work is to develop and create a real model of the electromechanical system of a small electric car.

Keywords: ELECTROMECHANICAL, SMALL ELECTRIC VEHICLE, VEHICLE, SYSTEM, PWM, CONVERTER, CONTROLLER, TORQUE, ACCELERATION, ACCELERATION.

| | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------------|---|------|---|--|-------|---------|
| | | | | | 141.61203.021.BW | | | |
| | | | | | | | | |
| | Letter | № of doc. | Sign. | Date | <i>Small electric vehicle electrical system Summary</i> | L. | Sheet | Letters |
| Devel. | | O. Voshkulat |  | | | | | |
| Checked | | S. Kovbasa |  | | | | 5 | 117 |
| | | | | | | NTUU «KPI», FEA Department AEMS-ED gr. EP-91mp | | |
| N. Contr. | | | | | | | | |
| Approved. | | S. Peresada | | | | | | |

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 9 |
| 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД | 12 |
| 1.1. Класифікація за типами двигунів, джерелами живлення, особливості функціонування | 12 |
| 1.2. Загальна інформація про електромеханічні системи малогабаритних електромобілів. | 21 |
| 1.3. Яскраві представники малогабаритних електромобілів | 23 |
| 1.4. Формування вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації | 25 |
| Висновки до розділу | 26 |
| 2. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ДВИГУНА ДЛЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ..... | 27 |
| 2.1. Розрахунок потужності і вибір двигуна | 27 |
| 2.1.1. Розрахунок параметрів двигуна в початковий момент часу: | 32 |
| 2.1.2. Розрахунок параметрів двигуна під час розгону електромобіля: | 33 |
| 2.1.3. Розрахунок параметрів двигуна після розгону до максимальної швидкості, і подальшим її підтриманням: | 34 |
| 2.2. Розрахунок динамічних та статичних характеристик при використанні двигуна 1ПІ 12.09-11-202..... | 35 |
| 2.3. Розрахунок акумуляторної батареї та супер конденсаторів ... | 38 |
| 2.3.1. Розрахунок акумуляторної батареї | 38 |
| 2.3.2. Розрахунок батареї супер конденсаторів | 40 |
| 2.4. Визначення параметрів ДПС | 41 |

| | |
|---|-----|
| 2.4.1. Визначення активного опору обмотки якоря..... | 41 |
| 2.4.2. Визначення сталої часу та індуктивності обмотки якоря... | 42 |
| Висновок по розділу | 45 |
| 3. РОЗРОБКА ШАСІ МАЛОГАБАРИТНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ . | 47 |
| 3.1. Розробка функціональної схеми..... | 48 |
| 3.1.1. Силова частина..... | 49 |
| 3.1.2. Контролер на основі цифрового сигнального процесора TMS320LF2406A | 50 |
| 3.2. Створення механічної частини малогабаритного електромобіля | 53 |
| 3.3. Створення електричної схеми малогабаритного електромобіля та вибір компонентів для неї..... | 63 |
| Висновок по розділу | 70 |
| 4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ... | 71 |
| 4.1. Розробка алгоритму регулювання швидкості двигуна | 71 |
| 4.2. Розробка програмного забезпечення | 76 |
| 4.2.1. Особливості реалізації алгоритмів керування з використанням цілочисельної арифметики..... | 76 |
| 4.2.2. Формати змінних | 79 |
| 4.2.3. Програмна реалізація алгоритму керування швидкістю | 80 |
| 4.3. Математичне моделювання | 82 |
| 4.4. Розробка системи широтно-імпульсного перетворювача- двигун (ШПІ-Д) | 84 |
| Висновок по розділу | 90 |
| 5. НАПИСАННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ | 92 |
| Висновок по розділу | 106 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 108 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 110 |
| ДОДАТОК 1..... | 113 |
| ДОДАТОК 2..... | 114 |
| ДОДАТОК 3..... | 115 |
| ДОДАТОК 4..... | 116 |
| ДОДАТОК 5..... | 117 |
| ДОДАТОК 6..... | 118 |

ВСТУП

В сучасному світі широкого розповсюдження почали набувати електричні транспортні засоби, завдяки своїй простоті та надійності. Найбільшого розповсюдження отримали індивідуальні електромобілі, але цінова політика їх є досить високою. Вирішити цю проблему можна за допомогою зменшення габаритних розмірів транспортного засобу, тим самим знизити фінансові затрати на його створення. Цей проект має на меті створення електромеханічної системи малогабаритного електромобіля. Тим самим розробити власну модель малогабаритного електромобіля під те технічне завдання, яке нам необхідно.

Ринкова пропозиція малогабаритних електромобілів тільки починає своє створення, але вже є перші серійні зразки. З огляду на це, проект є максимально наближеним до сучасних реалій і пропонує вирішення вже існуючих проблем, створення недорогих електромобілів з невеликим пробігом.

Актуальність

Сучасні електромобілі все більше починають заповнювати ринки транспортних засобів, як з огляду економічності використання рушійної енергії, так і з огляду альтернативної екологічності сучасним ДВЗ. Проблема екологічності вже давно назрівала над традиційними транспортними засобами (які в своїй конструкції використовують ДВЗ), і наступним логічним кроком їх розвитку є заощадливий електромобіль (який використовує електричний двигун).

Але з огляду на той факт, що сучасний ринок може запропонувати безліч різноманітних моделей, всі вони мають один єдиний мінус – це висока ціна. Тому, актуальним є розробка електромобіля власної конструкції. Для зниження фінансових і трудових затрат будемо розробляти малогабаритний електромобіль. Розробка повинна буде мати просту та легку конструкцію, маневреність, меншу вартість та просте керування.

Мета роботи

Полягає в розробці та створенні реальної моделі електромеханічної системи малогабаритного електромобіля, для проведення досліджень електромеханічних систем електричних транспортних засобів.

Об'єкт

Процеси керування координатами приводних двигунів електричних транспортних засобів.

Предмет дослідження

Електромеханічна система малогабаритного електромобіля.

Для поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі

1. Огляд стану проблеми, та формування основних задач дослідження.
2. Розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи.
3. Розробка алгоритмів керування електромеханічною системою.
4. Розробка моделюючої програми електромеханічної системи та системи керування, та визначення динамічних і статичних характеристик.
Розробка та виготовлення перетворювача напруги для двигуна постійного струму.
5. Проведення економічних розрахунків та стартап проектів.

Методи дослідження

Методи автоматичного керування, теорія електропривода, методи фізичного та статичного моделювання

Наукова новизна одержаних результатів

1. Розроблено конструкцію малогабаритного транспортного засобу який в подальшому буде використовуватись в якості лабораторний стенд для дослідження різноманітних електромеханічних систем.

Практичне значення

1. Розроблена електромеханічна система може бути виготовленою окремо, і поставлятись готовим комплектом для самостійного виготовлення чи переобладнання транспортних засобів в електромобіль.

2. Отримані напрацювання по виготовленню електромобіля дадуть можливість в майбутньому удосконаливши систему що існує, або виготовивши іншу, легко перевірити її працездатність в реальних умовах, на реальному обладнанні.

Публікації. Ю. М. Зайченко та О.І. Вошкулат, // «Програмна фільтрація швидкості при вимірюванні її за допомогою енкодера», *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*. – Київ: ФЕА «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. /О. І. Вошкулат та Н.Д. Красношاپка, // «Концепція електромеханічної системи дровоколу», *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*. – Київ: ФЕА «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. /В. С. Решетник та О.І. Вошкулат, // "Малогабаритний електромобіль для експериментальних досліджень електромеханічних систем", *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*. – Київ: ФЕА «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Електромобіль представляє пристрій, який приводиться в рух електричним двигуном. В якості палива використовується електроенергія від автономного джерела: паливних елементів, акумуляторів і так далі. Перші транспортні засоби з електродвигуном з'явилися в кінці 19 століття, проте їх серійне використання не відбулося через появу двигуна внутрішнього згоряння. Однак останнім часом електромобілям стало приділятися все більше увага. Багато великих автоконцернів стали випускати свої моделі машин з електродвигуном.[1]

В сучасних світових тенденціях, коли населення мегаполісів активно починає рости, і тим само пропорційно починає збільшуватись кількість транспортних засобів на дорогах міст. Це призводить до великих транспортних колапсів. Тому уряди більшості розвинених країн запроваджують пільги для власників електричних транспортних засобів, натомість висуваються жорсткі вимоги для власників ДВЗ. Але сам електромобіль коштує досить дорого, тим паче для звичайного пересування в місті його габарити є великими, і досить не зручними. Провідні компанії почали активно розробляти електромобілі які б ідеально підійшли для повсякденних задач. Це так звані малогабаритні електромобілі, вони займають мінімальну кількість місця, тим самим ідеально справляються з своїми функціями і коштують відносно дешево своїх старших аналогів. До того ж за своїм функціоналом вони не чим не відрізняються, хоча швидше заряджаються і мають запас ходу приблизно в 50-80 км.

1.1. Класифікація за типами двигунів, джерелами живлення, особливості функціонування

На сьогоднішній день в інтернеті можна зустріти різноманітні моделі електромобілів, розглянемо наступну класифікацію за габаритними розмірами:[2,3]

1. Повнорозмірні електромобілі;

2. Внутрішньоміські електромобілі;
3. Мікро електромобілі.

Також є ще один тип класифікації в залежності від типу привода. Оскільки в одному класу і навіть в рамках однієї моделі можуть бути різні типи приводів, де кожен силовий агрегат має свої особливості роботи, розглянемо типи приводів (Рисунок 1.1): [4,5]

1. BEV: Акумуляторні електромобілі (тільки електроенергія);
2. HEV: Гібридні електромобілі (електроенергія, бензин/дизпаливо);
3. PHEV: Плагін-гібридний (електроенергія, бензин/дизпаливо);
4. E-REV: Електромобіль зі збільшеним запасом ходу (електроенергія, бензин/дизпаливо);
5. FCEV: Електромобіль на паливних елементах (електроенергія, водень);

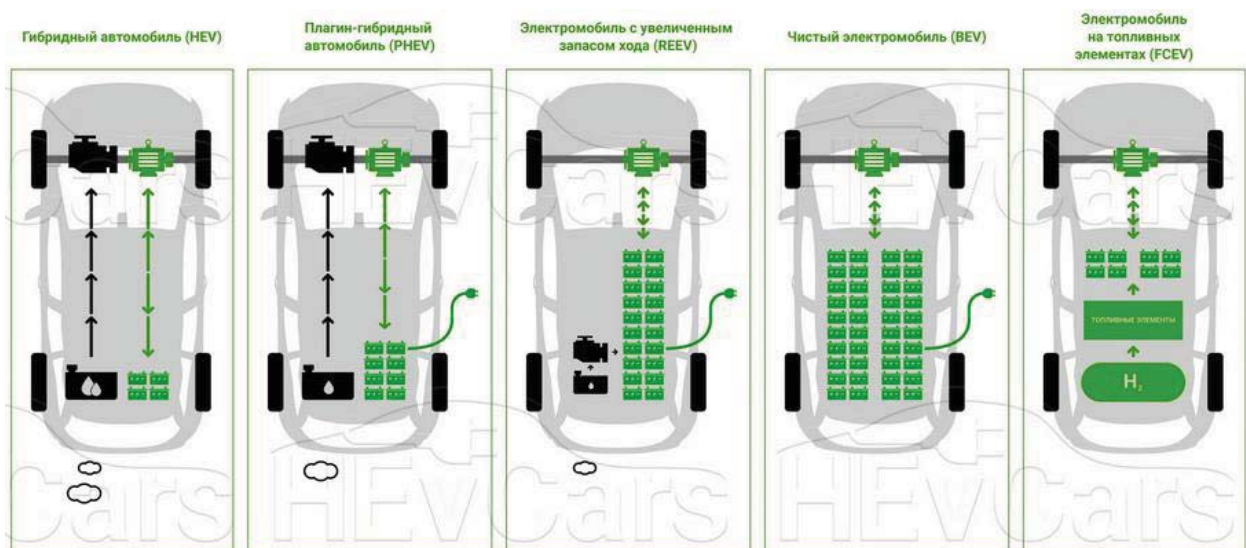


Рисунок 1.1 – Схема принципу роботи автомобілів з різними типами силових установок і видами силових агрегатів.

Повнорозмірний електромобіль (Full Sized EV) Термін «повнорозмірний електромобіль» має на увазі не тільки розміри - характеристики цих машин часто перевищують параметри автомобілів-донорів. Наявність потужного електромотора дає чудові динамічні характеристики (крутний момент електродвигуна дуже високий навіть на низьких оборотах, на відміну від ДВЗ).[2]



Рисунок 1.2– Приклад повнорозмірного електромобіля

Зазвичай такі електромобілі (Рисунок 1.2) комплектуються досить потужною акумуляторною батареєю, яка дозволяє проїхати до 200-250км на одному заряді. Двісті кілометрів - це досить пристойна цифра, такий запас ходу, з лишком, перебиває повсякденні потреби більшості автовласників.

Також треба зазначити, що основною особливістю даного типу електромобілів є наближення дальності пробігу, а також максимальної швидкості до автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння. Оскільки на даний момент вартість електромобіля визначається, в основному, вартістю електрообладнання, то повнорозмірні електромобілі коштують досить дорого.

Приклад електромобілів і їх виробників:

- Sports Utility Truck (SUT) від Phoenix MotorCars
- Venturi Fetish від Venturi
- Електро Porsche 911 і Porsche Boxter від World Class Exotics
- Електро Doblo від Micro-Vett
- EnerMove (електро Fiat Panda) від Ecolari
- AVT 100E мінівен від AVT
- Tesla Model S/Model X

Внутрішньоміські електромобіль Даний тип електромобілів має на увазі спеціально сконструйований для електромобіля дизайн кузова - практично всі представлені на ринку внутрішньоміські електромобілі побудовані на базі несучої рами з навісними пластиковими панелями. Це рішення дозволяє радикально знизити вагу електромобіля, а також зробити кузов більш довговічним.[2]



Рисунок 1.3– Приклад внутрішньоміського електромобіля

Внутрішньоміські електромобілі (Рисунок 1.3) мають обмеження максимальної швидкості пересування (блага правила дорожнього руху самі встановлюють таке обмеження), що дозволяє також зменшити критичний параметр ваги - встановлюється менш потужні (одночасно менш важкі) електродвигуни. Незважаючи на планку швидкості в 60-90км/год, водій внутрішньоміського електромобіля відчуватиме себе комфортно на дорогах - завдяки високому крутному моменту електродвигуна на низьких оборотах і низької ваги, електромобілі при старті від світлофора залишають далеко позаду більшість чадних побратимів.

Треба зазначити, що незважаючи на свою досить високу ціну ці машини вже міцно увійшли в побут людей багатьох міст світу. Виробництво внутрішньоміських електромобілів має найбільш перспективний напрямок для розвитку електротранспортної інфраструктури.

Приклад внутрішньоміських електромобілів і їх виробників:

- Reva Classe від Reva
- Ydea Electric від Micro-Vett
- Marenello SCE
- Kewet Buddy від elbiNORGE

Мікро електромобіль Даний тип електромобілів (Рисунок 1.4) є комплексним рішенням не тільки проблеми обмеженої місткості акумуляторної батареї, а й проблеми все зростаючого внутрішньоміського трафіку, що створює велику кількість транспортних пробок.[2]



Рисунок 1.4– Приклад мікро електромобілів

У внутрішньоміських умовах більшість переміщень жителів здійснюється в циклі дім-робота-магазин-будинки. Середнє значення подоланого відстані для середніх міст становить 25-35 кілометрів на день, причому в більшості випадків автомобіль везе тільки свого водія. Спираючись на даний факт, можна зазначити високу неефективність використання особистого автотранспорту.

Звичайний особистий автомобіль став настільки поширеним засобом пересування, що існуючі дороги часто не дозволяють пересуватися по ним з прийнятною швидкістю. Дороги можна і розширити, однак це проблему не вирішить. Одним з виходів є широке впровадження одно-двомісних мікроавтомобілів. Завдяки своїм габаритам на двосмуговій трасі може поміститися до 3-4 таких самопересувних колясок в ряд (подвоєння пропускної здатності дороги). Мало того, менші розміри вимагають меншої площі паркувальних місць (в три-чотири рази меншою, ніж для парковки повнорозмірного автомобіля).

Для електромобіля зменшення розмірів призводить до зменшення кількості акумуляторів в батареї при тій же дальності пробігу (за рахунок зниження ваги і аеродинамічного опору). Менша ємність акумулятора означає пристойну економію в ціні електромобіля. Мало того, застосування досить важкою (у порівнянні з баком бензину) акумуляторної батареї дозволяє

радикально знизити центр мас мікроавтомобіля, що серйозно позначається на стійкості такого засобу пересування.

Для скептиків, можна сказати, що мікро електромобілі вже бігають по вулицях міст світу.

Приклад мікро електромобілів і їх виробників:

- Tango
- Myers Motors No more Gas (NmG)
- Oka NEV ZEV від Oka Auto

Акумуляторні електромобілі (BEV), також відомі як «чисті електромобілі», повністю працюють від електрики. У них немає бензинового двигуна, паливного бака або вихлопної труби. Відомі також прототипи BEV такі як автобуси, мотоцикли, скутери і навіть човни, а також автомобілі. [3,4,5]

BEV - це електромобілі які підключаються до електромережі, тобто використовують зовнішню розетку для зарядки акумулятора. Хоча це може бути традиційна домашня розетка, рекомендується встановити домашню точку зарядки, так як вона набагато ефективніша для зарядки.

У цих повністю електричних транспортних засобів також є внутрішній спосіб зарядки акумуляторів за допомогою рекуперативного гальмування. Тобто використовує зусилля уповільнення транспортного засобу для підзарядки внутрішньої батареї, максимально використовуючи кінетичну і теплову енергію, яку витрачає більшість автомобілів.

В акумуляторних електромобілях електроенергія зберігається в бортових акумуляторних батареях великої ємності. Це акумулятори, спеціально розроблені для живлення автомобіля чи іншого транспортного засобу. Акумуляторні батареї використовуються для всієї електроніки з BEV, а також для електродвигунів.

До популярних акумуляторних електромобілів належать:

- BMW i3
- Renault Zoe
- Hyundai Ioniq

- Kia Soul
- Nissan LEAF
- Tesla Model S
- Tesla X
- Toyota Rav4
- Volkswagen e-Golf

Гібридний електромобіль (HEV), також стали відомими завдяки Toyota Prius ще з 1997 року. Джерелом енергії гібриду є як бензин або дизель, так і електроенергія. Два двигуни в звичайному гібриді керуються від внутрішньою комп'ютера. Ця система приймає рішення щодо того, який двигун використовує: електричний або бензиновий, в залежності від економічності та інших факторів (такі як умови руху та крейсерська швидкість) щоб автомобіль завжди працював так, як потрібно. [4,5,6]

До популярних гібридів належать:

- Toyota Camry Hybrid
- Toyota Prius Hybrid
- Honda Civic Hybrid

Гібридний електромобіль (PHEV), який має можливість підключатись до мережі. Тобто електрична батарея може заряджатися за допомогою зовнішнього зарядного пристрою, а другий двигун використовує звичайне паливо, так само, як і в звичайних гібридах. Фактично, через це було виявлено, що PHEV економлять до 60% витрат на енергію в порівнянні з іншими гібридами. [4,5,6]

Однією з відмінностей PHEV від звичайних гібридів є те, що, оскільки вони використовують зовнішній зарядний пристрій для електродвигуна, вони можуть мати нульовий діапазон викидів. Діапазон нульових викидів - це коли «автомобіль або фургон виділяє 75 г/км CO₂ або менше».

Ще однією відмінністю PHEV від стандартних гібридів є те, що на електричному двигуні вони можуть рухатися тільки на низьких швидкостях і на короткі відстані, потім спрацьовує звичайний двигун.

Батарея для PHEV, що не дивно, значно менше, ніж у BEV, що означає, що, хоча він здатний здійснювати більш короткі поїздки на електроенергії, звичайний двигун внутрішнього згорання необхідний для більш тривалих поїздок.

До плагін гібридів належать:

- Chevy Volt
- Ford Fusion Energi
- Mercedes GLE550e
- Mini Cooper SE Countryman
- Audi A3 E-Tron
- BMW X5 xDrive40e
- Porsche Cayenne S E-Hybrid
- Volvo XC90 T8
- VW Golf GTE
- Mitsubishi Outlander PHEV
- Prius Plug-In

Електромобіль зі збільшеним запасом ходу (E-REV), який має широкий вибір джерел живлення в залежності від моделі і фірми виробника. Тобто електромобілі E-REV приводяться в дію звичайним двигуном внутрішнього згорання, знімним акумулятором і електродвигуном. Ця комбінація спрямована на те, щоб дозволити цим транспортним засобам здійснювати більшість поїздок використовуючи електричну енергію, а ДВЗ використовувати в якості резервного. E-REV можуть мати викиди CO₂ менше ніж 20 г/км завдяки використанню електродвигуна. Для порівняння: поточна мета ЄС для транспортних засобів становить 95 грамів CO₂ на кілометр, що означає, що E-REV перевищують цю мету. [4,5,6]

Що стосується роботи, ці автомобілі будуть максимально використовувати електроенергію, а потім переключитися на звичайний двигун, коли необхідно буде більше потужності або швидкості, або під час подорожі батарея розрядиться. Ключові відмінності між E-REV і PHEV полягають в тому, що в E-REV колеса завжди приводяться в рух електродвигуном, і E-REV використовують двигун набагато меншого розміру, ніж PHEV.

До електромобілів зі збільшеним запасом ходу відносяться:

- BMW i3
- BMW i8
- Chevrolet Volt (now defunct)
- Vauxhall Ampera (now defunct)

Електромобіль на паливних елементах (FCEV), так званий транспортний засіб на водневих паливних елементах, який має батарею паливних елементів, і використовує водень для створення електричної енергії, необхідного для приведення в дію коліс транспортного засобу. [4,5,6]

Цікаво, що FCEV - це гібридний транспортний засіб, але не так, як ми могли б собі представити. Оскільки вони не використовують двигун внутрішнього згоряння, вони використовують батарею і паливний елемент. Паливний елемент - це електрохімічний пристрій, який, на відміну від акумулятора електромобіля, не вимагає зарядки. Швидше паливний елемент виробляє електрику і тепло з води, виробленої в вихлопній трубі. Він може виробляти електроенергію до тих пір, поки є постійний запас водню.

Оскільки електромобілі на паливних елементах не заряджається, ви можете заправляти їх на заправних станціях. Однак замість бензину ви заправляєте водень. Для дозаправки потрібно від трьох до п'яти хвилин, що набагато менше, ніж час зарядки навіть для самих швидких точок зарядки для BEV. У них є діапазон заправки 500 км, що означає, що вони використовують електроенергію, не обмежуючи відстань вашої подорожі, як багато електромобілі.

До електромобілів на паливних елементах відносяться:

- Honda FCX Clarity
- Hyundai Nexa
- Mercedes-Benz F-Cell
- Riversimple Rasa
- Toyota Mirai

1.2. Загальна інформація про електромеханічні системи малогабаритних електромобілів.

Малогабаритний електромобіль має декілька спрощену конструкцію, ніж машини з ДВЗ. До того ж в ній на порядок менше вузлів і деталей які можуть вийти з ладу. Сама електромеханічна система (Рисунок 1.5) є досить простою, так само як і механічна, і може з легкістю сказати, що ламатись там особливо нічому. [7]

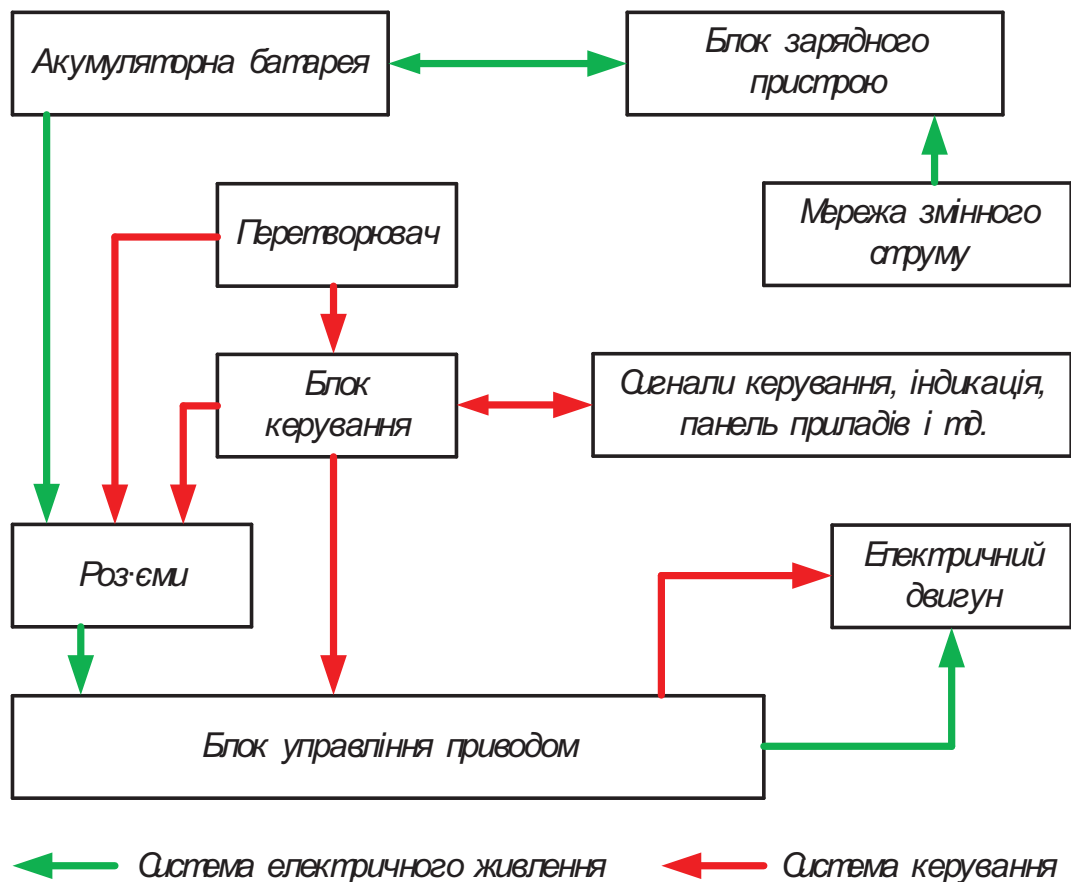


Рисунок 1.5 – Схема роботи електромеханічної системи малогабаритного електромобіля

Головними елементами в малогабаритному електромобілі є:

- Трансмсія. Це пристрій, який передає крутний момент від електричного двигуна до коліс автомобіля. Сюди входить коробка передач, механізми повороту і так далі.
- Акумулятор. Це джерело енергії, завдяки якому приводиться в рух двигун. Саме від нього залежить, яку відстань зможе проїхати автомобіль.
- Електронна система управління, яка контролює процеси зарядки, потужності, розподілу крутного моменту і цілий ряд інших параметрів.
- Бортовий зарядний пристрій, призначений для можливості зарядки автомобіля від звичайної електричної мережі або швидко зарядних станцій.
- Електричний двигун. Це серце автомобіля. Може бути різних типів, це може бути як двигун постійного струму, так і синхронний двигун, і навіть двигун змінного струму.
- Корпус, сидіння та інші елементи, властиві звичайному автомобілю.

Принцип дії малогабаритного електромобіля дуже схожий до звичайного з ДВЗ, але під капотом замість ДВЗ має електричну установку, яка отримує енергію від акумуляторів. Це свого роду «паливний бак». Для рівномірної подачі електричного струму на двигун використовується спеціальна система керування. За допомогою якої контролер керує двигуном в залежності від положення педаль акселератора і гальма. Таким чином двигун отримує чітко необхідну кількість енергії для своєї роботи в точний момент часу.

Також до контролера підходять сигнали з вхідних датчиків, які направляють сигнали про стан селектора перемикання передач, педаль гальма, заряду акумулятора і так далі. Двигун же працює за принципом електромагнітної індукції. Так він перетворює електричну енергію в механічну, направляючи крутний момент на колеса автомобіля. В результаті це змушує рухатися машину з необхідною швидкістю.

1.3. Яскраві представники малогабаритних електромобілів

На рисунках 6-11 показано яскравих представників малогабаритних електромобілів, і приведено порівняння за основними технічними характеристиками. [8,9]



Максимальна швидкість – 40км/год

Максимальна дальність пробігу –
50км/год

Час зарядки акумулятора – 6 год.

Рисунок 1.6 – Електрокар ІТ компанії Dynastie



Максимальна швидкість – 40км/год

Максимальна дальність пробігу –
48км/год

Час зарядки акумулятора – 6-8 год.

Рисунок 1.7 – Електрокар компанії General Electric Motorcars



Максимальна швидкість – 80км/год

Максимальна дальність пробігу – 40-
80км/год

Час зарядки акумулятора – 6-8 год.

Рисунок 1.8– Електрокар компанії Green Tech Automotive



Максимальна швидкість – 64км/год

Максимальна дальність пробігу – 64-
110км/год

Час зарядки акумулятора – 5-8 год.

Рисунок 1.9 – Електрокар компанії Green Tech Automotive



Максимальна швидкість –
80км/год

Максимальна дальність пробігу –
120км/год

Час зарядки акумулятора – 8 год.

Потужність двигуна – 18 кВт

Рисунок 1.10 – Електрокар Zotye E200 EV



Максимальна швидкість –
35км/год

Максимальна дальність пробігу –
120км/год

Час зарядки акумулятора – 8 год.

Потужність двигуна – 6 кВт

Рисунок 1.11 – Електрокар Lifan 300E

1.4. Формування вимог до електроприводу, систем автоматичного керування та автоматизації

До майбутнього малогабаритного електромобіля висуваються наступні вимоги: простота та легкість конструкції, мінімальна ціна використовуваних матеріалів, надійність основних вузлів. Плануються виконати раму з профілю 25*25 мм, за основу шасі використати велосипедні колеса діаметром 20".

За основу електропроводу використати двигуни постійного струму з ланцюговою передачею крутного моменту безпосередньо на диск колеса, за допомогою зірочок. Акумуляторна батарея буде зібрана з окремих Li-ion елементів типорозміру 18650. Також для перетворення енергії буде збиратись інвертор, який дасть можливість отримувати необхідну напругу для силового агрегату.

Тормозна система буде виконана з тормозних дисків велосипеда, які будуть встановлені на передні диски коліс. Також в схемі електроприводу теж буде передбачена функція гальмування двигуном.

Регулювання швидкості електромобіля буде відбуватись за рахунок педалі газу з потенціометром. Вона буде розташовуватись поряд педалі гальма. Також в системі керування буде передбачено механізм який реалізовує напрямку руху електромобіля, як вперед так і назад.

Висновки до розділу

Проаналізувавши проведену роботу можна сказати, що електромобіль має досить значні переваги перед звичайним автомобілем з ДВЗ. Було проведено огляд існуючого ринку електромобілів, де порівнювалися різні габаритні розміри та типи силових агрегатів.

Тому на дипломне проектування було обрано автомобіль тільки з електричною силовою установкою (BEV), і габаритними розмірами типу мікро електромобіля. Оскільки основна проблема виготовлення електромобіля є дороговизна його основних компонентів, тому для відточення принципів і технології достатньо буде і не великого транспортного засобу.

Для реалізації даного проекту необхідно повністю з нуля виготовити основні конструкції. Це є рама транспортного засобу, шасі, рульова колонка, сидіння і тд.. А також розробити і встановити електричний привід, акумуляторну батарею, і органи керування транспортним засобом.

2. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ДВИГУНА ДЛЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Розрахунок потужності і вибір двигуна

Вихідні данні електромобіля для виконання розрахунків електромобіля [10]:

- Власна маса електромобіля $m_{ел.} = 95(кг)$;
- Маса корисного вантажу, або вантажопідйомність $m_k = 150(кг)$;
- Максимальна швидкість електромобіля $V_{max} = 10(м / с) = 36(км / год)$;
- Максимальне прискорення $a_{max} = 1(м / с^2)$;
- Діаметр коліс транспортного засобу $d_k = 20'' = 0.508 \approx 0.51(м)$;

На Рисунок 2.1 зображено габаритні креслення електромобіля в вигляді збоку, і на Рисунок 2.2 зображено габаритні креслення електромобіля в вигляді спереду:

- Довжина рами електромобіля $L = 2000(мм)$;
- Ширина рами електромобіля $B = 1030(мм)$;
- Висота найвищої точки над рамі електромобіля $H = 1100(мм)$;
- Довжина колісної бази по центрам $k_b = 1200(мм)$;
- Ширина колісної колії по центрам $k_k = 900(мм)$.

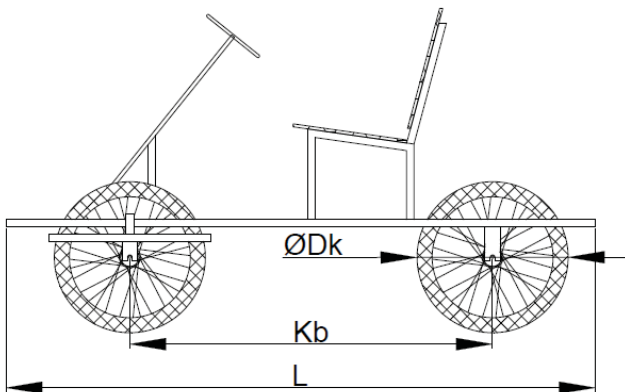


Рисунок 2.1 - Вигляд збоку

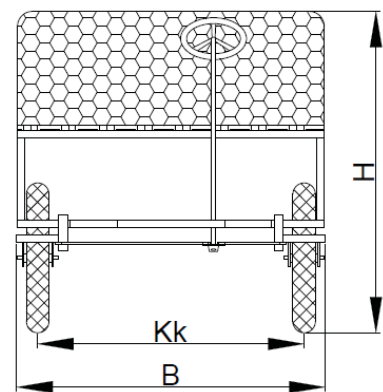


Рисунок 2.2 - Вигляд спереду

Наступним кроком для розрахунку потужності нам необхідно визначитись з зусиллями (Рисунок 2.3), які діють на транспортний засіб, і їх напрямками.

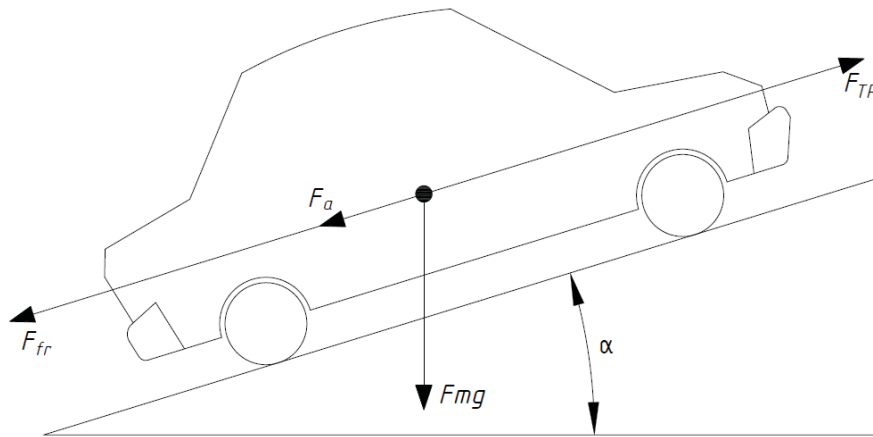


Рисунок 2.3 - Схема зусиль які діють на транспортний засіб

З схеми Рисунок 2.3 можна зрозуміти яке тягове зусилля повинен створювати двигун електромобіля, щоб компенсувати силу опору тертя, силу опору тяжіння (при русі як по рівні поверхні так і під певний кут нахилу), силу динамічного опору, а також створювати необхідне прискорення. В результаті це можна записати у вигляді формули:

$$F_{TR} = F_{fr} + F_a + F_{mg} + m \cdot a \quad (2.1)$$

де F_{TR} - тягове зусилля двигуна; F_{fr} - сила опору тертя; F_a - сила аеродинамічного опору; F_{mg} - сила тяжіння; m - загальна маса електромобіля і корисного навантаження; a - величина прискорення електромобіля.

Сила опору тертя :

$$F_{fr} = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha \quad (2.2)$$

де g - прискорення вільного падіння 9.81 м/с^2 ; f_r - коефіцієнт тертя-кочення, приклади наведені в Таблиця 2.1; α – кут нахилу поверхні по якій рухається електромобіль.

Сила аеродинамічного опору:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V - V_w)^2 \quad (2.3)$$

В формулі (2.3) швидкістю вітру V_w ми нехтуємо, приймаємо рівною нулю, тому формула матиме наступний вигляд:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 \quad (2.4)$$

де ρ – густина повітря 1.29 кг/м³; A_f - площа фронтального перерізу електромобіля; C_D - коефіцієнт аеродинамічного супротиву, приклади наведені в Таблиця 2.2; V - швидкість електромобіля; V_w - швидкість вітру.

Таблиця 2.1 - Коефіцієнти опору тертя-кочення

| Умови | Величина коефіцієнта тертя-кочення f_r |
|--|--|
| Автомобільні шини на бетоні або асфальті | 0.013 |
| Автомобільні шини на рулонному ґравії | 0.02 |
| Брущатка | 0.025 |
| Ґрунтова дорога | 0.05 |
| По паханій землі | 0.1-0.35 |
| Шини для вантажівок на бетоні або асфальті | 0.006-0.01 |
| Колеса на залізничній колії | 0.001-0.002 |

Сила тяжіння :

$$F_{mg} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.5)$$

В формулу (2.1) підставляємо величини (2.2), (2.4), (2.5) та напишемо результуючий вигляд:

$$F_{TR} = m \cdot g \cdot f_n \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 + m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot a \quad (2.6)$$

Кут нахилу поверхні ми приймемо рівним нулю, $\alpha = 0$, оскільки поки наш електромобіль буде рухатись по рівній поверхні. Звідси $\cos \alpha = 1$, а $\sin \alpha = 0$. Перепишемо формулу (2.6) в наступний вигляд:

$$F_{TR} = m \cdot g \cdot f_n + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 + m \cdot a \quad (2.7)$$

Виконаємо розрахунок площі фронтального перерізу для формули (2.7):

$$A_f = B \cdot H = 1.03 \cdot 1.1 = 1.13(m^2) \quad (2.8)$$

Таблиця 2.2 - Коефіцієнти аеродинамічного опору

| Тип транспортного засобу | Коефіцієнт аеродинамічного опору C_D |
|--|--|
| Відкритий кабриолет | 0.5-0.7 |
| Кузов фургона | 0.5-0.7 |
| Понтонний корпус | 0.4-0.55 |
| Клиноподібне тіло; фари та бампери інтегровані в кузов, покриті нижньою частиною кузова, оптимізований потік охолоджуючого повітря | 0.3-0.4 |
| Фара та всі колеса в кузові, закриті під кузовом | 0.2-0.25 |
| К-подібний корпус | 0.23 |
| Оптимальний обтічний дизайн | 0.15-0.20 |
| Вантажівки, автопоїзди | 0.8-1.5 |
| Автобуси | 0.6-0.7 |
| Обтічні автобуси | 0.3-0.4 |
| Мотоцикли | 0.6-0.7 |

Під час виготовлення електромобіля, було експериментально визначено опір терня. Значення цього параметру визначалась за допомогою електронного каунтера, тобто зусилля було виміряне в кілограмах. Для подальшої роботи з

цим параметром необхідно перевести параметр в Нм за допомогою формули (2.9):

$$F_{fr} = m \cdot g \quad (2.9)$$

де m - зусилля яке ми визначили, g - прискорення вільного падіння 9.81 м/с^2 .

Експеримент проводився на абсолютно рівній поверхні, однією стороною електронного каунтера було зачеплено до електромобіля, за іншу його сторону виконувався рівномірний рух вперед. При експерименті з пустим електромобілем було зафіксовано величину в 1.5 кг, а при русі з поворотом коліс 2.5 кг. При тих самих умовах але експеримент був проведений з пасажиром (вага якого 70-80 кг) було зафіксовано величину в 3.5 кг, а при русі з поворотом коліс 4.5 кг.

Розрахуємо опір тертя з нашого експериментального досліджу:

$$F_{fr1} = 1.5 \cdot 9.81 = 14.7(\text{Нм});$$

$$F_{fr2} = 3.5 \cdot 9.81 = 34.3(\text{Нм});$$

Далі перепишемо формулу (2.2) в такому вигляді, щоб можна було визначити значення коефіцієнта тертя кочення, при цьому не забуваємо, що отримані данні ми проводили на рівній поверхні, тому $\alpha = 0$ і звідси ж $\cos \alpha = 1$:

$$f_r = \frac{F_{fr}}{m \cdot g} \quad (2.10)$$

де F_{fr} - сила опору тертя розрахована вище; m - загальна вага електромобіля.

В першому випадку $m_2 = m_{ел.} + m_{к1} = 95 + 0 = 95(\text{кг})$, а в другому випадку $m_2 = m_{ел.} + m_{к2} = 95 + 75 = 170(\text{кг})$ підставимо отримані значення в формулу (2.10):

$$f_{r1} = \frac{F_{fr1}}{m \cdot g} = \frac{14.7}{95 \cdot 9.81} = \frac{14.79}{931.95} = 0.0157$$

$$f_{r2} = \frac{F_{fr2}}{m \cdot g} = \frac{34.3}{120 \cdot 9.81} = \frac{34.3}{1177.2} = 0.029$$

Як видно з розрахунків коефіцієнт тертя-кочення в обох випадках має наближене значення, тому визначимо середнє арифметичне:

$$f_r = \frac{f_{r1}}{f_{r2}} = \frac{0.0157}{0.029} = 0.018$$

Як бачимо отримане значення 0.018 відповідає табличним значенням Таблиця 2.1.

2.1.1. Розрахунок параметрів двигуна в початковий момент часу:

Визначимо тягове зусилля в при умовах коли $V = 0(\text{км} / \text{год})$; $a = 1(\text{м} / \text{с}^2)$ тобто в початковий момент часу. Для цього ми визначимо загальну вагу $m = m_{\text{ел.}} + m_{\text{к}} = 95 + 150 = 245(\text{кг})$ і підставимо в формулу (2.7), в результаті вона матиме вид:

$$F_{TR} = m \cdot g \cdot f_r + m \cdot a = 245 \cdot 9.81 \cdot 0.018 + 245 \cdot 1 = 43.26 + 245 = 288.26(\text{Н})$$

Наступним кроком визначимось зі швидкістю яка буде на нашому колесі, якщо $V_{\text{max}} = 10(\text{м} / \text{с})$, а $d_{\text{к}} = 0.51(\text{м})$, або $r_{\text{к}} = d_{\text{к}} / 2 = 0.51 / 2 = 0.255(\text{м})$ то формула буде мати вигляд:

$$V = \omega_{\text{к}} \cdot r_{\text{к}} \quad (2.11)$$

Оскільки нам треба визначити швидкість колеса, то формулу (2.11) нам необхідно переписати наступним чином:

$$\omega_{\text{к}} = \frac{V}{r_{\text{к}}} = \frac{10}{0.51 / 2} = \frac{10}{0.255} = 39.22(\text{рад} / \text{с})$$

Задамо стандартним значенням номінальної частоти обертання двигуна $n_n = 1000(\text{об} / \text{хв})$ для подальших розрахунків. Для цього переведемо об/хв в рад/с і матимемо $\omega_{\text{д.н.}} = 1000 \cdot 0.105 = 105(\text{рад} / \text{с})$.

В результаті коефіцієнт передачі між двигуном і колесом буде визначатись як :

$$i_p = \frac{\omega_{д.н.}}{\omega_{\kappa}} = \frac{105}{39.22} = 2.7$$

Тепер визначимо критичний момент який необхідний для обертання колеса, щоб створити прискорення рівне 1м/с:

$$M_{\kappa} = F_{TR} \cdot r_{\kappa} = 288.26 \cdot 0.255 = 73.5(Нм)$$

Далі визначимось з моментом який повинен буде розвиватись на валу двигуна:

$$M_{дв} = \frac{M_{\kappa}}{i_p} = \frac{73.5}{2.7} = 27.2(Нм)$$

В результаті в нас розраховані всі данні для розрахунку потужності двигуна:

$$P_{дв} = \omega_{д.н.} \cdot M_{дв} = 105 \cdot 27.2 = 2856 \approx 2.9(кВт)$$

2.1.2. Розрахунок параметрів двигуна під час розгону електромобіля:

Визначимо тягове зусилля в при умовах коли $V = 10(м / с)$; $a = 1(м / с)$, тобто в початковий момент часу. Для цього ми візьмемо попередньо розраховану вагу $m = m_{ел.} + m_{\kappa} = 95 + 150 = 245(кг)$ і підставимо в формулу (2.7) , в результаті вона матиме вид:

$$F_{TR} = m \cdot g \cdot f_n + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 + m \cdot a = 245 \cdot 9.81 \cdot 0.018 + 0.5 \cdot 1.29 \cdot 1.13 \cdot 0.6 \cdot 10^2 + 245 \cdot 1 = 43.26 + 43.73 + 245 = 332(Нм)$$

Використовуючи розрахунки з початкового моменту часу визначимо критичний момент який необхідний для обертання колеса, щоб створити прискорення рівне 1м/с:

$$M_{\kappa} = F_{TR} \cdot r_{\kappa} = 332 \cdot 0.255 = 84.66(Hm)$$

Далі визначимось з моментом який повинен буде розвиватись на валу двигуна:

$$M_{\partial\partial} = \frac{M_{\kappa}}{i_p} = \frac{84.66}{2.7} = 31.36(Hm)$$

В результаті в нас розраховані всі данні для розрахунку потужності двигуна:

$$P_{\partial\partial} = \omega_{\partial.н.} \cdot M_{\partial\partial} = 105 \cdot 31.36 = 3293.8 \approx 3.3(кВт)$$

2.1.3. Розрахунок параметрів двигуна після розгону до максимальної швидкості, і подальшим її підтриманням:

Визначимо тягове зусилля в при умовах коли $V = 10(м/с)$; $a = 0(м/с)$, тобто в початковий момент часу. Для цього ми візьмемо попередньо розраховану вагу $m = m_{ел.} + m_{\kappa} = 95 + 150 = 245(кг)$ і підставимо в формулу (2.7), в результаті вона матиме вид:

$$F_{TR} = m \cdot g \cdot f_n + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 = 245 \cdot 9.81 \cdot 0.018 + 0.5 \cdot 1.29 \cdot 1.13 \cdot 0.6 \cdot 10^2 = 43.26 + 43.73 = 87(Hm)$$

Використовуючи розрахунки з початкового моменту часу визначимо критичний момент який необхідний для обертання колеса, щоб створити прискорення рівне 1м/с:

$$M_{\kappa} = F_{TR} \cdot r_{\kappa} = 87 \cdot 0.255 = 22.19(Hm)$$

Далі визначимось з моментом який повинен буде розвиватись на валу двигуна:

$$M_{\partial\partial} = \frac{M_{\kappa}}{i_p} = \frac{22.19}{2.7} = 8.2(\text{Hm})$$

В результаті в нас розраховані всі данні для розрахунку потужності двигуна:

$$P_{\partial\partial} = \omega_{\partial.n.} \cdot M_{\partial\partial} = 105 \cdot 8.2 = 862.75 \approx 0.9(\text{kBm})$$

2.2. Розрахунок динамічних та статичних характеристик при використанні двигуна 1ПІ 12.09-11-202

В наявності на кафедрі було знайдено двигуни постійного струму виробництва Болгарської фірми «Динамо-Сливен». Технічні характеристики двигуна типу 1ПІ 12.09-11-202:

- Напруга живлення $U = 60(\text{V})$;
- Номінальний крутний момент $M_{\partial\partial.n} = 3.5(\text{Hm})$;
- Номінальна частота обертання $\omega_n = 105(\text{rad} / \text{c})$.

Розрахує основні дані яких нам не вистачає для об'єктивного розрахунку [11]:

- Потужність двигуна номінальна

$$P_{\partial\partial} = M_{\partial\partial.n} \cdot \omega_n = 3.5 \cdot 105 = 367(\text{Bm});$$

- Коефіцієнт корисної дії приймемо рівним $\eta = 94\%$;

- Струм номінальний $I_n = \frac{P_{\partial\partial}}{\eta_{\partial\partial} \cdot U} = \frac{367}{0.94 \cdot 60} = 6.5(\text{A})$

- Величина перевантаження $\lambda \cdot I_n = 3$;

- Максимальний струм $I_{\max} \lambda \cdot I_n = 3 \cdot 6.5 = 19.5(\text{A})$;

- Магнітний потік $c\Phi = \frac{U}{\omega_n} = \frac{60}{105} = 0.57(\text{Bб})$;

В якості передатного механізму було використано ланцюгову передачу, з комплектами двох зірочок. Кількість зубів зірочки двигуна $z_{\partial\partial} = 15$, а та що встановлюється на привідне колесо $z_{\kappa} = 51$. Звідси маємо що реальне передатне число буде рівне:

$$i_p = \frac{z_{\kappa}}{z_{\partial\partial}} = \frac{51}{15} = 3.4$$

В електромобілі буде використана акумуляторна батарея, яка також є в наявності. Тип елементів батареї є Li-Ion. Напруга на батареї $U_{\max} = 48V$. Звідси ми можемо розрахувати реальну максимальну швидкість двигуна, яку ми можемо отримати від живлення нашою АКБ:

$$\omega_{\partial.\max} = \frac{U_{\max}}{c\Phi} = \frac{48}{0.57} = 84.2(\text{рад} / \text{с})$$

Швидкість на колесі електромобіля буде :

$$\omega_{\kappa.\max} = \frac{\omega_{\partial.\max}}{i_p} = \frac{84.2}{3.4} = 24.76(\text{рад} / \text{с})$$

Визначимо максимальну швидкість безпосередньо самого електромобіля:

$$V_{\max} = \omega_{\kappa.\max} \cdot r_{\kappa} = 24.76 \cdot 0.255 = 6.3(\text{м} / \text{с})$$

Визначимо максимальний момент колеса:

$$M_{\kappa.\max} = M_{\partial\partial.\max} \cdot i_p = \lambda \cdot M_{\partial\partial.\text{н}} \cdot i_p = 3 \cdot 3.5 \cdot 3.4 = 35.7(\text{Нм})$$

Номінальний момент на колесі двигуна:

$$M_{\kappa.\text{н}} = M_{\partial\partial.\text{н}} \cdot i_p = 3.5 \cdot 3.4 = 11.9(\text{Нм})$$

Тягове зусилля двигуна номінальне:

$$F_{TRH} = \frac{M_{\kappa.H}}{r_{\kappa}} = \frac{11.9}{0.255} = 46.7(\text{Hм})$$

Тягове зусилля двигуна максимальне:

$$F_{TR\max} = \frac{M_{\kappa.\max}}{r_{\kappa}} = \frac{35.7}{0.255} = 140(\text{Hм})$$

Виходячи з вище приведених розрахунків ми можемо порахувати величину прискорення, при цьому аеродинамічну складову $F_a = 0$ ми приймемо рівну нулю. Тоді формула (2.7) прийме наступний вигляд:

$$F_{TR} = m \cdot g \cdot f_r + m \cdot a \quad (2.12)$$

З цієї формули ми можемо виразити величину прискорення:

$$a = \frac{F_{TR} - m \cdot g \cdot f_r}{m} \quad (2.13)$$

Використовуючи формулу (2.13), розрахуємо прискорення при різних величинах ваги і зусилля опору тертя, всі результати будуть зведені в Таблиця 2.3. Всі ці розрахунки необхідні для того, щоб можна було зрозуміти на що спроможний наш двигун.

Таблиця 2.3 – Розрахунки величини прискорення при різних умовах.

| | | |
|---|---|---|
| Вага яку перевозить електромобіль (кг) | $\frac{1}{2} \cdot m_{\kappa} + m_{el} =$ $= \frac{1}{2} \cdot 150 + 50 = 125$ | $m_{\kappa} + m_{el} =$ $= 150 + 50 = 200$ |
| Зусилля опору тертя (Hм) | м/с | м/с |
| $F_{TRH} = 46.7$ | 0.098 | 0.014 |
| $F_{TR\max} = 140$ | 0.64 | 0.39 |

Також визначимо на який кут нахилу поверхні α може піднятися наш електромобіль якщо використовувати вищезгаданий ДПС. При цьому

аеродинамічну складову $F_a = 0$ ми прийнемо рівну нулю, так як електромобіль або буде підійматись досить повільно, або взагалі буде стояти нерухомо. Тоді формула (2.6) прийме наступний вигляд:

$$F_{TR} = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.14)$$

Оскільки кут нахилу поверхні буде досить малим і можна сказати що рівним нулю, тому ми прийнемо, що $\cos \alpha \approx 1$. Тоді формула (2.14) перепишемо так, щоб знайти наш кут нахилу поверхні α :

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{F_{TR} - m \cdot g \cdot f_r}{m \cdot g} \right) \quad (2.15)$$

Використовуючи формулу (2.15), розрахуємо кут нахилу поверхні α при різних величинах ваги і зусилля опору тертя, всі результати будуть зведені в Таблиця 2.4. Всі ці розрахунки необхідні для того, щоб можна було зрозуміти на що спроможний наш двигун.

Таблиця 2.4 – Розрахунки величини нахилу поверхні α при різних умовах.

| | | |
|--|---|--|
| Вага яку перевозить електромобіль (кг) | $\frac{1}{2} \cdot m_k + m_{el} =$ $= \frac{1}{2} \cdot 75 + 95 = 170$ | $m_k + m_{el} =$ $= 150 + 95 = 245$ |
| Зусилля опору тертя (Нм) | <i>rad / %</i> | <i>rad / %</i> |
| $F_{TRn} = 46.7$ | 0.009/1 | 0.065/0.14 |
| $F_{TRmax} = 140$ | 0.065/6.54 | 0.039/3.98 |

2.3. Розрахунок акумуляторної батареї та супер конденсаторів

2.3.1. Розрахунок акумуляторної батареї

В якості акумуляторної батареї ми будемо використовувати АКБ які є в наявності. Наразі це Li-ion Battery фірми Evelbike напругою $U_{bat} = 48$ (В) і ємністю $C_{bat} = 10.6$ (Ah).

Розрахуємо потужність АКБ [12,13,14]:

$$P_{bat} = U_{bat} \cdot I_{bat} = 48 \cdot 10.6 = 508.8 \text{ (Вт)}$$

Розрахуємо енергію яку може накопичити в собі батарея за годину часу:

$$W_{bat} = P_{bat} \cdot T = 508.8 \cdot 3600 = 1831680 \approx 1.8 \text{ (МДж)}$$

Розрахована максимальна швидкість електромобіля $V_{max} = 6.3 \text{ (м / с)}$

Розрахуємо тепер тягове зусилля яке може розвинути двигун визначається як :

$$F_{тяг} = F_{fr} + F_a$$

де $F_a = 1/2 \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 = 0.5 \cdot 1.29 \cdot 1.13 \cdot 0.6 \cdot 6.3^2 = 17.36 \text{ (Н)}$;

$$F_{fr1} = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha = m \cdot 9.81 \cdot 0.015 \cdot 1 = m \cdot 0.147$$

Виходячи з цього ми можемо розрахувати потужність яка необхідна щоб підтримувати задане тягове зусилля при тій максимальній швидкості:

$$P_{тяг} = \frac{V_{max} \cdot F_{тяг}}{\eta_{дв} \cdot \eta_{інв}} = \frac{6.3 \cdot F_{тяг}}{0.9 \cdot 0.8} = \frac{6.3 \cdot F_{тяг}}{0.72}$$

Далі необхідно визначити час, на який нам повинно вистачити запасу енергії АКБ:

$$W_{bat} = P_{тяг} \cdot t_{пуху} \quad (2.16)$$

З формули (2.16) виведемо значення часу:

$$t_{пуху} = W_{bat} / P_{тяг} = 1831680 / P_{тяг}$$

Тепер визначимо максимальний шлях, який зможе проїхати наш автомобіль:

$$S = V_{max} \cdot t_{пуху} = 6.3 \cdot t_{пуху}$$

Отримані данні зводимо в одну Таблиця 2.5 щоб можна було їх проаналізувати.

Таблиця 2.5 – Результуючі дані

| | | | |
|--|--|--|---------------------------------|
| $F_{\text{тяг}} = F_{\text{fr}} + F_a$ | $P_{\text{тяг}} = \frac{6.3 \cdot F_{\text{тяг}}}{0.72}$ | $t_{\text{пыху}} = 1831680 / P_{\text{тяг}}$ | $S = 6.3 \cdot t_{\text{пыху}}$ |
| $F_{\text{тяг}1} = 42.36 \text{ (Нм)}$ | $P_{\text{тяг}1} = 371 \text{ (Вт)}$ | $t_{\text{пыху}1} = 4937 = 82 \text{ (хв)}$ | $S_1 = 31.1 \text{ (км)}$ |
| $F_{\text{тяг}2} = 53.46 \text{ (Нм)}$ | $P_{\text{тяг}2} = 494 \text{ (Вт)}$ | $t_{\text{пыху}2} = 3708 = 62 \text{ (хв)}$ | $S_2 = 23.4 \text{ (км)}$ |

Як можна бачити з результатів, при пересуванні одного пасажирів в електромобілі довжина шляху який він подолає складає 31.1 км. А при пересування двох пасажирів, довжина шляху скоротиться до 23.4 км.

2.3.2. Розрахунок батареї супер конденсаторів

В наявності також є батарея супер конденсаторів, які також можна застосувати в нашому проекті. Це була б так звана гібридне джерело живлення, оскільки супер конденсатори використовуються переважно для того, щоб швидко забирати енергію при гальмуванні, і швидко видавати, коли потрібно швидко розігнатись. Тим самим він позбавляє АКБ від великих струмів заряду і розряду, тим самим продовжує термін експлуатації самої батареї [12,15].

Вихідними параметрами супер конденсатора є: Ємність $C = 1 \text{ (Ф)}$, та напруга $U_C = 100 \text{ (В)}$.

Визначимо кінетичну енергію яку має наш транспортний засіб при його постійному русі:

$$W_k = \frac{m \cdot V^2}{2} = \frac{m \cdot 6.3^2}{2} = \frac{m \cdot 39.7}{2}$$

Тепер визначимо кількість кінетичної енергії для 1 пасажирів $m=170$ (кг):

$$W_{\kappa 1} = \frac{170 \cdot 39.7^2}{2} = 3375 \text{ (Дж)}$$

і визначимо кількість кінетичної енергії для 1 пасажирів $m=245$ (кг):

$$W_{\kappa 2} = \frac{245 \cdot 39.7^2}{2} = 4863 \text{ (Дж)}$$

Далі визначимо енергію яку зможе поглинути наш супер конденсатор:

$$W_C = C \cdot \frac{m \cdot V^2}{2} = 1 \cdot \frac{100^2}{2} = 5000 \text{ (Дж)}$$

Як можемо побачити, кількість енергії супер конденсатора є достатньою для поглинання всієї кінетичної енергії транспортного засобу [16].

2.4. Визначення параметрів ДПС

2.4.1. Визначення активного опору обмотки якоря

Електрична принципова схема установки для визначення активного опору обмотки якоря двигуна зображена на Рисунок 2.4. Виміри здійснюються при нерухомому валу двигуна, тобто $\omega=0$, $E=0$, для декількох кутових положень валу, з метою зменшення впливу колекторно-щіткового вузла на точність вимірювань.

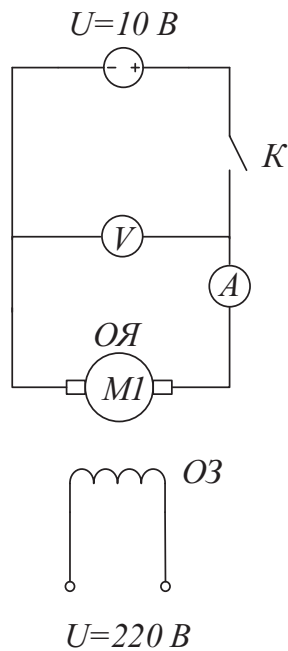


Рисунок 2.4 – Електрична принципова схема установки для визначення активного опору обмотки якоря

Для вимірювання опору якоря двигуна необхідно виміряти напругу і струм. Результати вимірювань є наступні: $U_V = 3.2(B)$, $I_A = 3.8(A)$, а $R_{\text{я}}$ визначається за формулою як:

$$R_{\text{я}} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{3.2}{3.8} = 0.84(Ом) \quad (2.17)$$

2.4.2. Визначення сталої часу та індуктивності обмотки якоря

Функціональна схема установки для визначення сталої часу та індуктивності якорного кола двигуна зображена на Рисунок 2.5. Виміри здійснюються при нерухомому валу двигуна, тобто $\omega = 0$, $E = 0$.

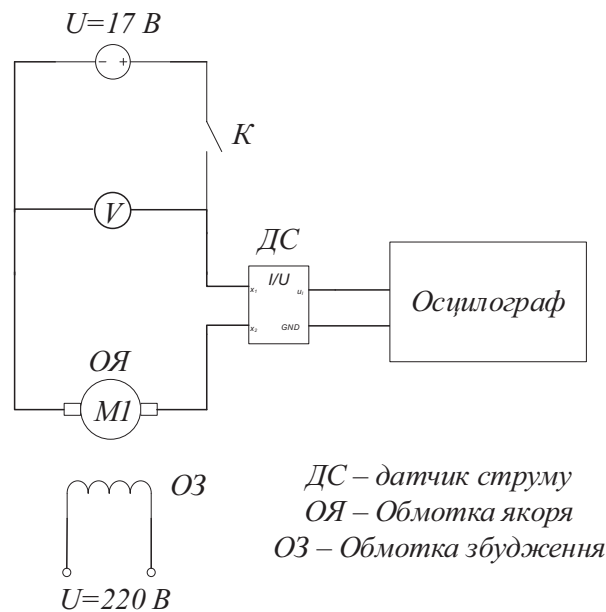


Рисунок 2.5 – Функціональна схема установки для визначення сталої часу та індуктивності якорного кола двигуна

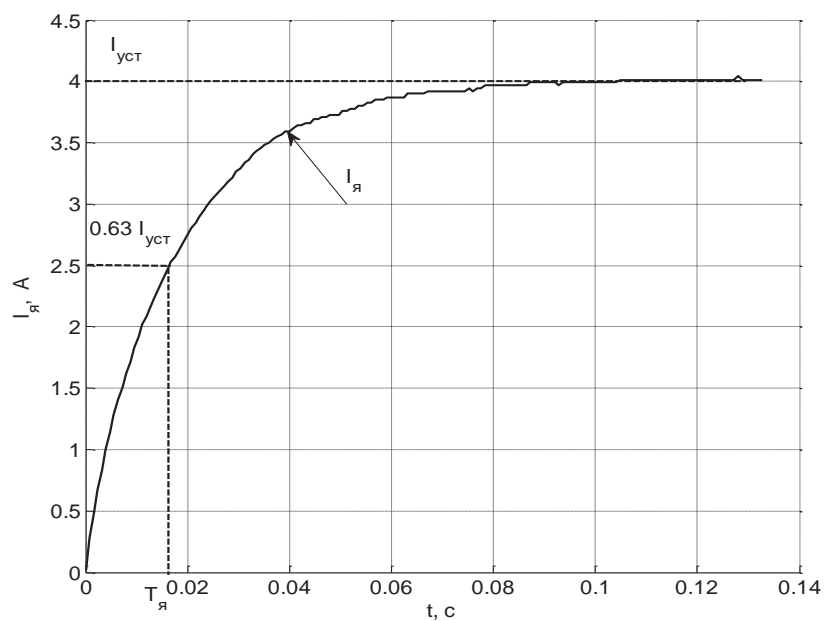


Рисунок 2.6 – Перехідний процес струму якоря двигуна при подачі стрибком напруги якоря $U = 3.2\text{ В}$

При виконанні досліджень за допомогою цифрового осцилографа та відповідного програмного забезпечення одержуємо графік перехідного процесу струму якоря двигуна при подачі стрибком напруги якоря $U = 17\text{ В}$, показаний на Рисунок 2.6.

У відповідності до методу визначення сталої часу, відміряємо значення струму на рівні $0.63I_{уст}$, що відповідає струму:

$$I = 0.63I_{уст} = 0.63 \cdot 4 = 2.52 \text{ (A)} \quad (2.18)$$

З Рисунок 2.6 знаходимо значення сталої часу якоря:

$$T_я = 0.017 \text{ с}$$

Індуктивність якоря визначаємо згідно виразу:

$$L_я = T_я \cdot R_я = 0.017 \cdot 0.84 = 0.01428 \text{ (Гн)} \quad (2.19)$$

Для перевірки визначених параметрів в пакеті Matlab 2009 (Simulink) створена математична модель якорного кола двигуна Рисунок 2.7.

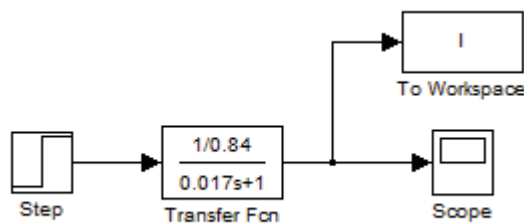


Рисунок 2.7 – Математична модель якорного кола двигуна

Перехідні процеси струму якоря для проведеного тесту, отримані методом математичного моделювання та експериментально, показані на Рисунок 2.8.

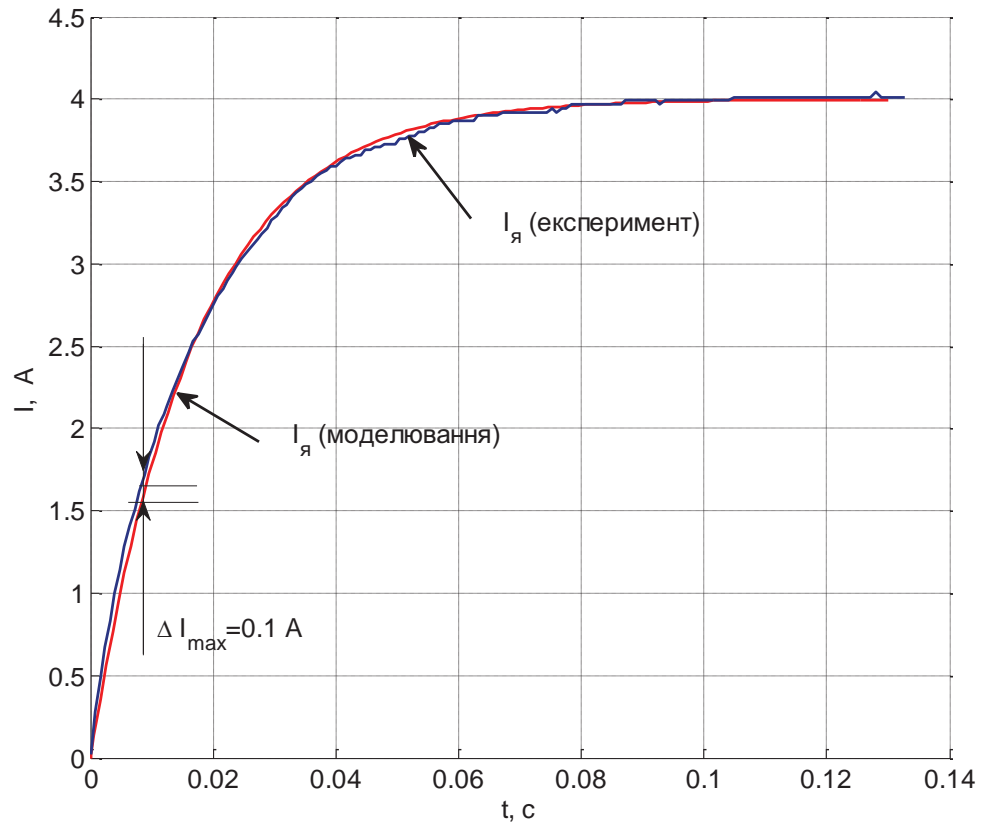


Рисунок 2.8 – Графіки перехідного процесу струму якоря двигуна при моделюванні та експериментальних дослідженнях

Як видно з Рисунок 2.8 при визначених параметрах двигуна $R_{\text{я}}$, $L_{\text{я}}$, $T_{\text{я}}$ експериментальні графіки та графіки отримані при моделюванні практично співпадають, максимальна похибка складає $\Delta I_{\text{max}} = 0.1 \text{ A}$, тобто 2.5% від $I_{\text{уст}}$.

Висновок по розділу

В даному розділі було виконано розрахунок потужності двигуна який був необхідний для приведення в рух електромобіля. Розрахункова потужність двигуна склала 3.3 кВт, при умові що прискорення буде на рівні 1 м/с.

В наявності такий двигун був відсутній, але було знайдено два ідентичних двигуни постійного струму, на номінальну напругу 60В. За розрахунками проведеними для даних двигунів, якщо їх ввімкнути послідовно, то максимальна потужність складе приблизно 1.8 кВт. В свою чергу прискорення електромобіля буде рівним 0.6 м/с при руху одного

пасажира, і 0.4 м/с для руху двох пасажирів. Максимально можливий кут нахилу поверхні в такому випадку складе 6.5% для одного пасажиру, та 4% для двох пасажирів.

Оскільки наш електромобіль в своїй більшості є лабораторним стендом, і пересуватись буде по рівній підлозі приміщення, то такий варіант з використанням двох двигунів має право на таке існування.

Також було проведено розрахунок АКБ тих які були в наявності, і було визначено що її ємності є достатньою для подолання шляху 31.1 км для одного пасажирів, і 23.4 км для двох пасажирів. При цьому, при необхідності збільшення запасу ходу, ми легко можемо під'єднати ще декілька АКБ, з'єднавши їх в паралель.

Ще було проведено розрахунок на використання батареї супер конденсаторів, який показав, що тієї ємності яка є в наявності, повністю достатньо для поглинання всієї кінетичної енергії нашого електромобіля. Це може говорити про те, що є можливість реалізації гібридного джерела живлення.

І в кінці було визначено параметри ДПС, які були необхідні для програмування контролера. Тобто коректної роботи двигуна постійного струму при використанні алгоритму керування швидкістю.

3. РОЗРОБКА ШАСІ МАЛОГАБАРИТНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Для вибору конструктиву електромобіля було проведено аналітичну роботу по вивченню різних конструкцій електромобілів, в результаті на просторах інтернету було знайдені деякі цікаві конструкції, на основі яких було створено ескіз (Рисунок 3.1) [17]. Він відповідає всім вимогам, які висувалися для електромобіля, а саме: простота конструкції, місце для водія і пасажирів, легкість керування.

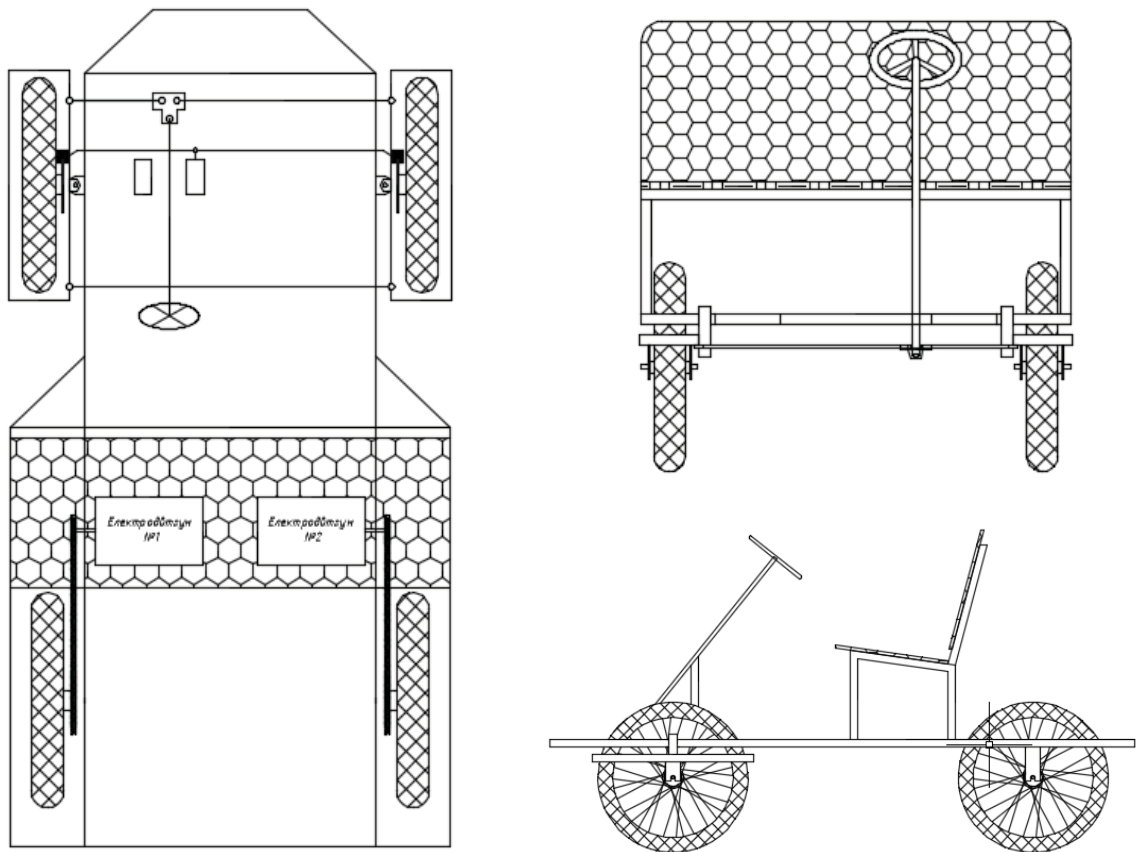


Рисунок 3.1 – Ескіз майбутнього електромобіля

Даний прототип дав більш правильно зрозуміти як правильно виконати компонування, та якими основними розмірами необхідно задатись. Використовуючи принцип порівняння, на основі ескізу (Рисунок 3.1) було розроблено креслення самої рами електромобіля, оскільки вже було приблизне розуміння габаритних розмірів, якими необхідно було задатись для проектування.

3.1. Розробка функціональної схеми

Розглядаючи установку керування двигуном постійного струму з незалежним збудження, можна підрозділити її на дві основні складові: систему керування, як правило це цифровий контролер, який безпосередньо виконує розрахунок алгоритму керування двигуном в реальному масштабі часу і силову частину, яка перетворює напругу мережі живлення в задану напругу якоря ДПС з НЗ, що формується згідно алгоритму керування [18,19]. На Рисунок 3.2 представлена функціональна схема.

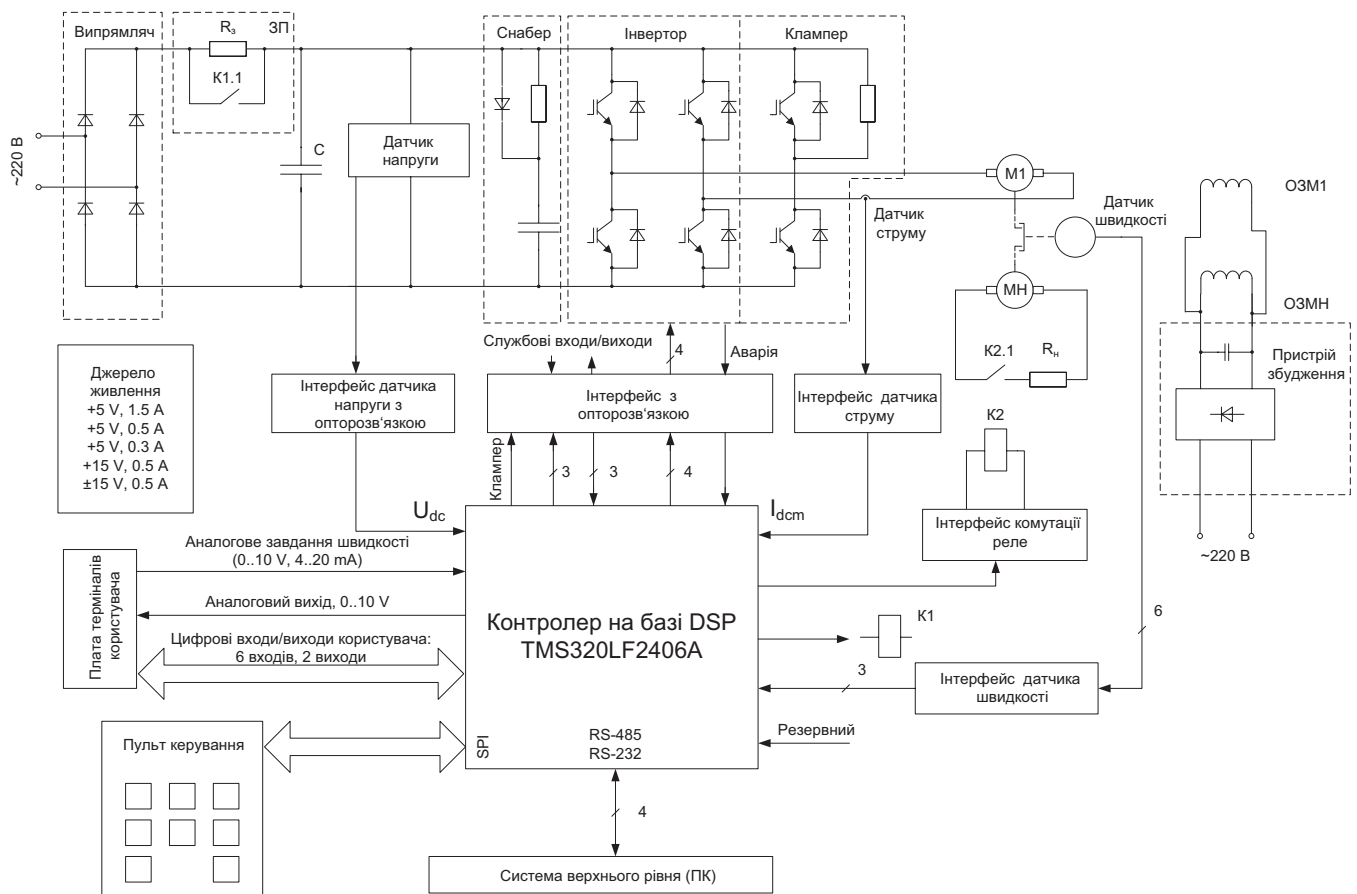


Рисунок 3.2 – Функціональна схема

Електропривод постійного струму включає наступні функціональні блоки:

- *Силова частина.* До її складу входять: випрямляч, ланка постійного струму з клампером для розсіювання енергії, що отримується від двигуна в генераторних режимах, інвертор, а також датчики струму якоря та напруги у ланці постійного струму.
- *Керуючий контролер,* що призначений для отримання завдання на відпрацювання швидкості, розрахунок алгоритму керування швидкості, розрахунок ШІМ та видача імпульсів керування ключами, реалізація захисних функцій, а також загальне керування схемою.
- *Схеми узгодження сигналів* керуючої та силової частини. Ці схеми повинні здійснювати гальванічну розв'язку силових кіл та кіл керування, що забезпечує більш високу завадостійкість системи керування, і є необхідним для захисту системи керування при аварійних ситуаціях в силовій частині.
- *Інтерфейс користувача.* До нього відносяться: сигнали дискретного і аналогового вводу/виводу, пульт керування, що забезпечує введення параметрів в систему, вивід інформації про стан системи, значеннях змінних, а також сигналізацію помилок, аварійних ситуацій.
- *Джерело живлення.* До джерела живлення ставляться високі вимоги відносно стабільності вихідної напруги, а також стійкості роботи при порушенні режиму роботи мережі живлення.

Визначивши загальний склад ЕП постійного струму, розглянемо більш детальніше кожен функціональний блок.

3.1.1. Силова частина

- *Силовий випрямляч* перетворює змінну напругу мережі живлення в постійну напругу в ланці постійного струму.
- *Датчик напруги* призначений для отримання значення напруги у ланці постійного струму, що використовується при розрахунку заданої керуючої напруги двигуна, та реалізації захисту від перевищення/пониження напруги.

- *Зарядний пристрій (ЗП)*, або коло плавного заряду ємності випрямляча складається із зарядного реле і стандартного резистору або терморезистору з позитивним температурним коефіцієнтом.
- Ємність (С) *фільтра силового випрямляча* набирається паралельним ввімкненням електролітичних конденсаторів.
- *Клампер* призначений для розсіювання енергії, що отримується від двигуна в генераторних режимах. Реалізований з допомогою одного із ключів інвертора та додаткового зовнішнього резистору.
- *Снабер* слугує для усунення високочастотних стрибків напруги, що виникають при комутації силових ключів.
- Гальванічно розв'язаний *датчик струму* призначений для організації зворотного зв'язку по струму якоря, а також максимального струмового захисту.
- *Інвертор* перетворює постійну напругу на виході випрямляча в задану напругу керування двигуном.
- *Драйвер інвертора* призначений для перетворення логічних сигналів керування ключами в імпульси напруги, що забезпечують надійну роботу транзисторів інвертора в ключовому режимі.

3.1.2. Контролер на основі цифрового сигнального процесора TMS320LF2406A

Функціональна схема контролера для керування ЕП постійного струму зображена на Рисунок 3.3. Структура контролера містить наступні функціональні блоки:

- Ядро контролера побудоване на основі ЦСП TMS320LF2406A.

Основні характеристики:

- 16 розрядний процесор з 32 розрядним акумулятором;
- Тактова частота – 40 МГц;
- Виконання операцій типу $Y=AB+C$ за один такт;
- Виконання операції ділення – 16 тактів.

Пам'ять:

- 32 kWord внутрішньої флеш-пам'яті;
- kWord внутрішньої оперативної пам'яті.
- Аналогові входи:
 - 4 входи, 10 розрядний АЦП, час перетворення 1мкс;
 - 1 аналоговий вхід з діапазоном 0..10 В;
 - 3 аналогових входи з діапазоном 0..5 В.

Аналогові входи датчиків струму/напруги додатково проходять через фільтри другого порядку з частотою зрізу 2.5 кГц.

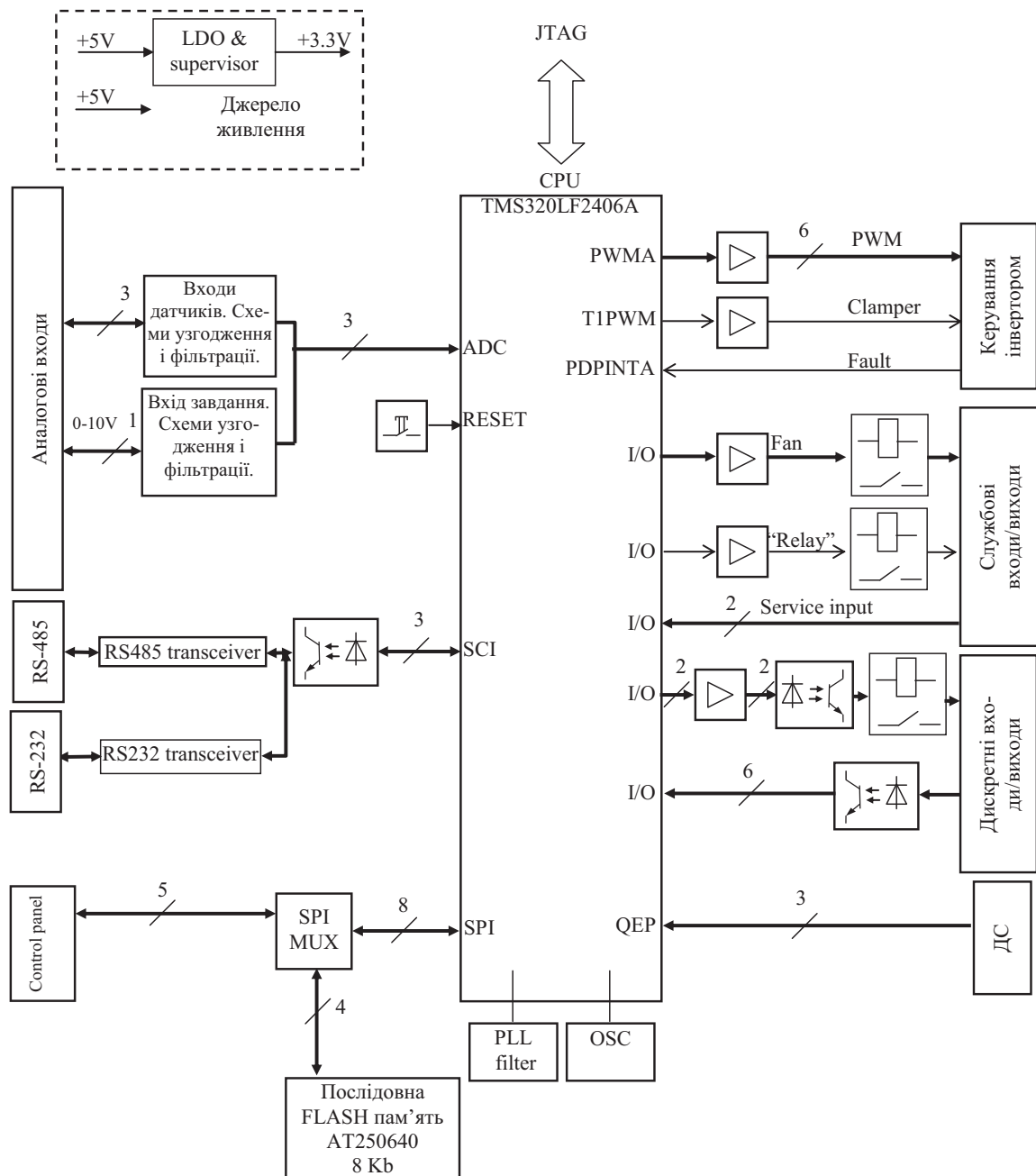


Рисунок 3.3 – Функціональна схема контролера

- Для керування перетворювачем слугують два порти:
 - керування безпосередньо інвертором (6 ШІМ імпульсів і сигнал захисту перетворювача), сигнал керування клампером;
 - порт сервісних входів/виходів призначений для керування модулями на силовій платі (напр. зарядне реле).
- Вхід датчика швидкості. Призначений для прийому трьох стандартних послідовностей з фото-імпульсного датчика швидкості.

- SPI мультиплексор розширює SPI порт процесора на два пристрої:
 - SPI Flash – для зберігання налаштувань системи;
 - пульт керування.
- Комунікаційні інтерфейси:
 - гальванічно розв'язаний інтерфейс RS-485;
 - гальванічно розв'язаний інтерфейс RS-232.
- Дискретні входи/виходи користувача. На платі контролера сформовано:
 - 6 гальванічно розв'язаних дискретних входів
 - 2 гальванічно розв'язаних дискретних виходи, типу «сухий контакт».

Службові модулі та живлення. До службових модулів, встановлених на платі контролера, відносяться кварцевий резонатор, PLL фільтр, супервайзер живлення і стабілізатор, що перетворює рівні напруги +5 В / +3.3 В.

3.2. Створення механічної частини малогабаритного електромобіля

Першочергова конструкція задавалась такими розмірами, щоб вона могла перевозити двох осіб. Було виконано приблизний розрахунок на характеристики міцності конструкції рами, та розрахунок електромеханічної системи. В результаті на основі ескізів (Рисунок 3.1), було вже сформовано креслення рами (Рисунок 3.4 та Рисунок 3.5).

Для виготовлення рамної конструкції, за розрахунками, потрібно було використати профільну трубу 25*25 мм зі стінкою 1,5мм. Габаритний розмір розраховувався таким чином, щоб було можливо пересування двох осіб одночасно, водія та пасажирів. Після не хитрих слюсарних маніпуляцій зі слюсарним і зварювальним обладнанням було сконструйовано саму раму рис.15. На виготовлення якої знадобилось приблизно 14 метрів профілю 25*25 мм.

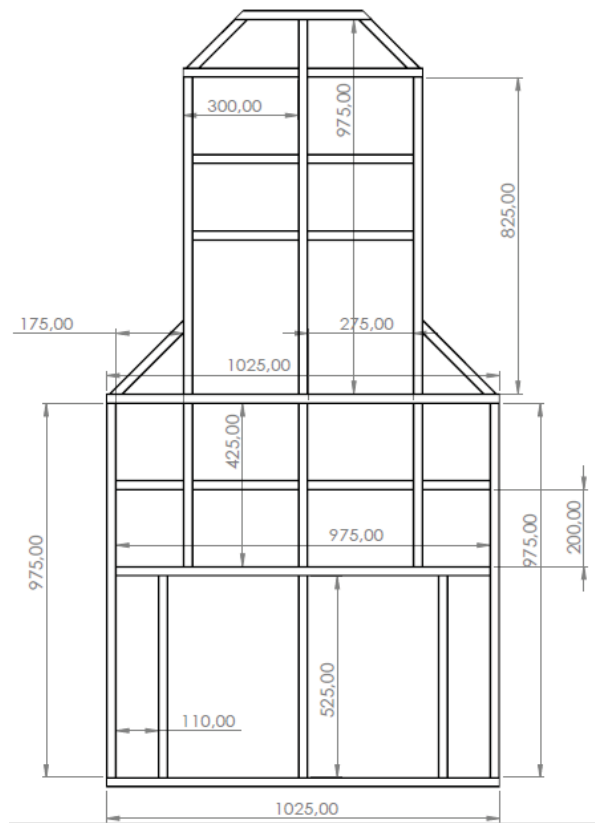


Рисунок 3.4— Креслення рами
електромобіля

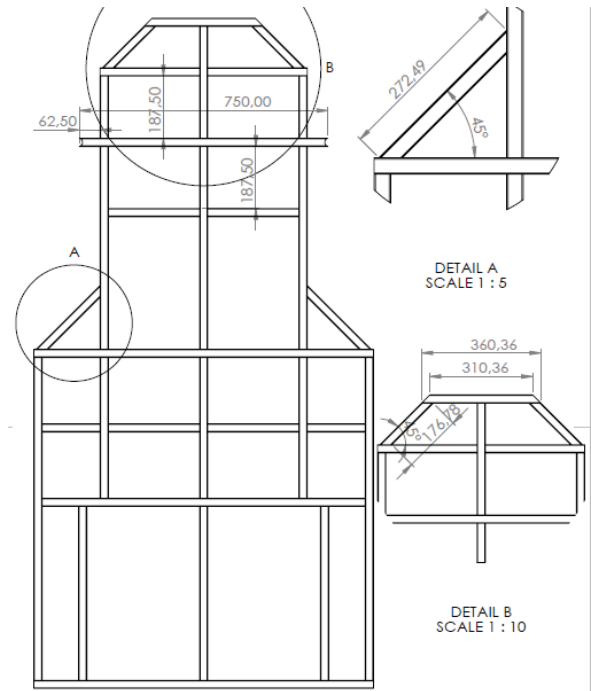


Рисунок 3.5— Уточнююче креслення
рами

Конструкцію рами (Рисунок 3.6) виконано з урахуванням можливої модернізації, або заміни обладнання. На ній достатньо місця і для встановлення потужних акумуляторних батарей і додаткових місць для сидіння пасажирів.



Рисунок 3.6 – Створення реальної рами електромобіля

Проектом передбачено використання велосипедних колеса діаметром 20" з спеціальними збільшеними дисками (Рисунок 3.7), на яких можна закріпити як приводну зірочку, так і спеціальний гальмівний диск.

Реалізація кріплення передніх коліс повинна бути такою, щоб вони могли повертатись для виконання маневрів транспортним засобом. Оскільки велосипедні колеса мають спеціальне кріплення, то для них необхідно виготовити спеціальні рамки (Рисунок 3.8), до яких вже потім будуть кріпитися самі колеса (Рисунок 3.10).



Рисунок 3.7 – Велосипедні колеса діаметром 20"

Конструкція рамки виконана з аналогічного профілю 25*25 мм зі стінкою 1,5мм, так як в наявності залишилися відрізки з виготовлення рами електромобіля.

Рамка для переднього колеса
Надо сделать 2 штуки
Труба профильная 25x25x2

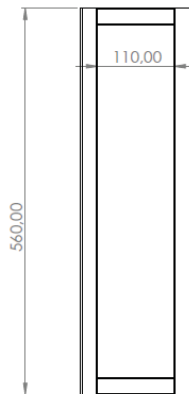


Рисунок 3.8 – Креслення рамки для встановлення передніх коліс



Рисунок 3.9 – Спеціальна рамка для передніх коліс

Кріплення ж самих коліс є можливим завдяки виготовленню спеціальних вушок Рисунок 3.10. Задні колеса кріпляться за допомогою довгих вушок, які приварюються напряду до рами електромобіля (Рисунок 3.11). Передні колеса кріпляться за допомогою коротких вушок до поворотної рамки (Рисунок 3.9). Товщина металу з якого були виготовлені вушка, є 3мм.

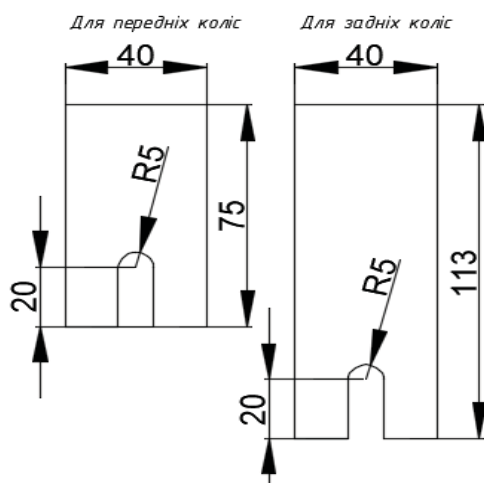


Рисунок 3.10 – Креслення вушок кріплення коліс



Рисунок 3.11 – Вигляд вушок для кріплення коліс

Рамка для кріплення передніх коліс кріпиться на шарнірному з'єднанні до рами транспортного засобу, що в майбутньому буде забезпечувати можливість вивороту коліс.

В результаті не складних слюсарних і зварювальних операцій в нас вийшла готова рама електромобіля на колесах (Рисунок 3.12) тобто шасі.



Рисунок 3.12 – Шасі електромобіля

Рульовий механізм повинен бути максимально простим, але так щоб виконував свої основні функції з повороту коліс. В основу його конструкції було покладено принцип паралелограма, і складається з однієї довгої тяги, яка з'єднує дві дальніх сторони рамки передніх коліс, і двох коротких тяг. Короткі тяги в свою чергу з'єднують передню частину рамки передніх коліс Рисунок 3.13.

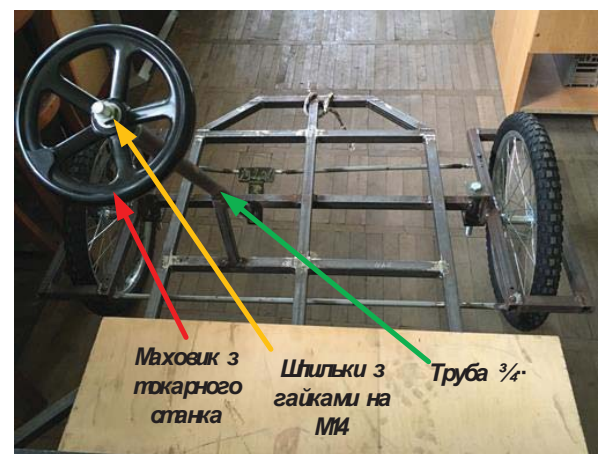
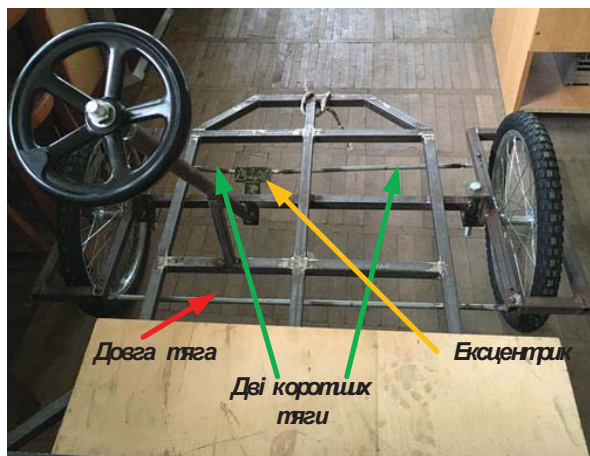


Рисунок 3.13 – Рульовий механізм

Рисунок 3.14 – Рульова колонка

Основу рульової колонки було виконано з круглої труби діаметром 3/4", поліпропіленової труби та шпильки М14. Вся ця конструкція збирається за допомогою 8 гайок та 4 шайб на М14, ексцентрикового механізму і безпосередньо самого руля Рисунок 3.14. При повороті руля, обертовий момент передається на ексцентрик, який розташовується в нижній частині рульової колонки, і він, в залежності від напрямку повороту, тягне одну тягу, а штовхає іншу. В результаті чого виконується поворот в одну зі сторін.

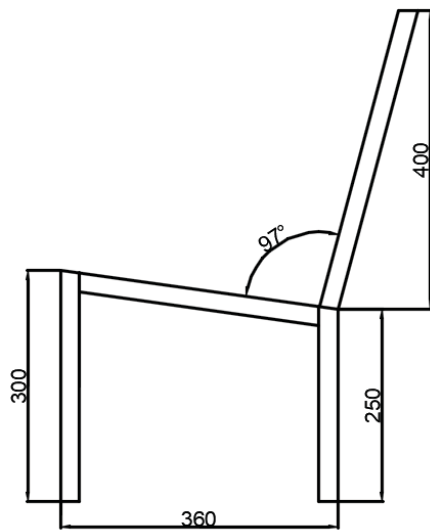


Рисунок 3.15 – Ескіз сидіння водія



Рисунок 3.16 – Конструкція рами лавки

Місце водія електромобіля було вирішено зробити відразу і для пасажирів, тобто сумісним. Це була гарна ідея, оскільки електромобіль не буде мати велику швидкість, і на сидіння зможе від двох до трьох пасажирів, різної комплектації. Виготовлено його було у вигляді лавки (Рисунок 3.15) зі спинкою з тієї ж профільної труби 25*25 мм що і сама рама.

Спочатку було виготовлено раму під сидіння (Рисунок 3.16), і в подальшому вона була зашита листами МДФ Рисунок 3.17. В результаті вийшла досить зручна і проста конструкція.



Рисунок 3.17 – готова конструкція лавки для водія і пасажирів

Електромобілі має мати гальмівну систему, вона буде реалізовуватись двома методами. Перший підхід, це гальмування за рахунок двигуна, який буде реалізовуватись програмно. Другий підхід, це як аварійний варіант, для більш безпечного пересування, і він реалізований за використання механічних гальм.

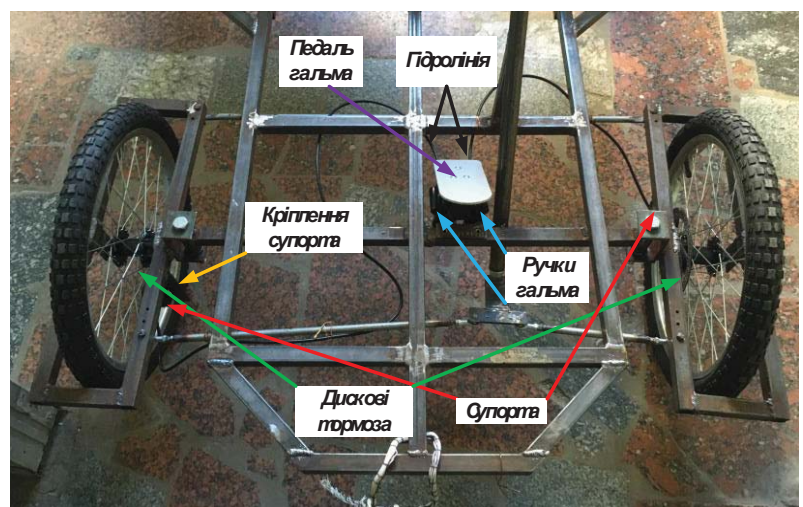


Рисунок 3.18 – Дискові
гальма

Рисунок 3.19 – Встановлення тормозної системи
на електромобілі

За їх основу було взято дискові гальма з гідравлічною системою фірми Tektro Auriga HD-M290N Рисунок 3.18.

Самі диски тормозної системи встановлювався на передні колеса. Супорт тормозної системи кріпиться на спеціальний кронштейн до поворотних рамок передніх коліс електромобіля (Рисунок 3.20). За допомогою імпровізованої педалі, зусилля передається на дві ручки гальма одночасно. А вони в свою чергу по гідро лініям передають зусилля на гальмівні колодки супортів, які виконують гальмування передніх коліс (Рисунок 3.19).

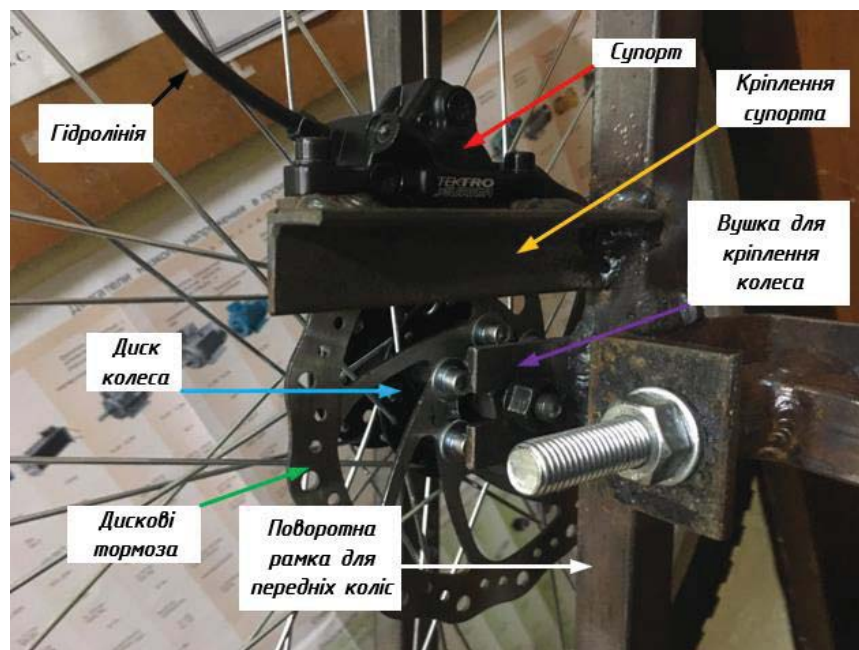


Рисунок 3.20 – Вузол тормозної системи на передніх колесах

Силовий елемент який надає основний поступальний рух електромобілю це електричний двигун. В наявності був електричний двигун постійної напруги з фланцевим кріпленням Рисунок 3.21. За приблизними розрахунками його технічні характеристики підходили для наших задач.



Рисунок 3.24 – Розташування двигуна на рамі електромобіля

Передаточний механізм виконаний наступним чином (Рисунок 3.23), в результаті маленька зірочка була встановлена на вал двигуна, а велика на вісь одного (правого) колеса. Сам двигун було вирішено розмістити ближче до середини, під сидінням водія (Рисунок 3.24).

Після деяких первинних випробувань, стало зрозуміло, що потужності одного двигуна для руху по рівній поверхні є достатньо. Але при руху по якійсь похилій поверхні виникають деякі складності з нехваткою потужністю. Тому було прийнято рішення про встановлення ще одного двигуна на ліве колесо електромобіля, що в свою чергу збільшить крутний момент в двічі. Цей двигун розмістили аналогічно першому, тільки дзеркально (Рисунок 3.25).

Далі було вирішено придати рамі електромобіля естетичного вигляду, всі шви було зачищено, і погрунтовані фарбою. На цьому механічні і слюсарні роботи по виготовленню електромобіля були завершені.



Рисунок 3.25 – Встановлення другого двигуна

3.3. Створення електричної схеми малогабаритного електромобіля та вибір компонентів для неї

Наступним кроком в виготовленні електромеханічної системи було розробити і спаяти плату яка б реалізовувала схему широтно-імпульсного перетворювач-двигун (ШПІ-Д).

Схема перетворювача (Рисунок 3.26) для керування ДПС розробляємо на основі системи широтно-імпульсної модуляції (додатково схема наведена на ватмані).

- 15.DC-DC перетворювач для драйверів і контролера XL7015 – 2шт.
- 16.Потенціометр для завдання швидкості двигуна 1кОм – 1шт.
- 17.Роз'єм підключення, датчика струму і педалі газу на 3 пінов – 2шт.
- 18.Роз'єм для підключення живлення і двигуна на 3піна – 2шт.
- 19.Акумуляторна батарея Evelbike 48V 10.6 Ah, Li-ion Battery.
- 20.Автоматичний вимикач двополюсний на 25А.

Макетна плата

Макетна плата з гетинаксу, має розміри 90x150 мм та є двостороння з металізацією отворів. Крок отворів 2 мм.

Радіатор охолодження

Радіаторний профіль виконаний з алюмінію, має габаритні розміри 100x200 мм.

IGBT ключі

В якості ключів було використано IGBT модулі STGW39NC60VD з наступними характеристиками [20] (Таблиця 3.1):

Таблиця 3.1 - Параметри STGW39NC60VD

| Параметр | Величина | 1 | 2 |
|-----------------|---------------------|----------------------------|-------|
| 1 | 2 | Напруга К-Е | 600В |
| Тип монтажу | ТНТ | Струм колектора | 40А |
| Виробник | ST Microelectronics | Заряд бази | 126Нс |
| Потужність | 250 Вт | Напруга Б-Е | ±20В |
| Тип корпусу | ТО-247-3 | Струм колектора пульсуючий | 220А |
| Тип транзистора | IGBT | | |

Драйвера для керування ключами

В якості драйверів було використано IR2102 з наступними технічними характеристиками [21] (Таблиця 3.2):

Таблиця 3.2 - Параметри IR2102

| Параметр | Величина | 1 | 2 |
|----------|----------|---|---|
|----------|----------|---|---|

| | | | |
|-------------|-----------------------|-------------------|--------------|
| <i>1</i> | <i>2</i> | Напруга живлення | 10-20В |
| Тип монтажу | ТНТ | Вихідний струм | -270 – 130мА |
| Виробник | Infineon Technologies | Кількість каналів | 2 |
| Потужність | 1 Вт | Час ввімкнення | 160нс |
| Тип корпусу | DIP8 | Час вимикання | 150нс |

Оптична розв'язка

Оптична розв'язка ,була вибрана HCPL2631 з наступними технічними характеристиками [22] (Таблиця 3.3):

Таблиця 3.3 - Параметри HCPL2631

| Параметр | Величина | <i>1</i> | <i>2</i> |
|-------------|--------------------|---------------------|----------|
| <i>1</i> | <i>2</i> | Тип напівпровідника | оптрон |
| Тип монтажу | ТНТ | Швидкість передачі | 10Мбит/с |
| Виробник | ON Semiconductor | Кількість каналів | 2 |
| Вид виходу | Відкритий колектор | Час ввімкнення | 50нс |
| Тип корпусу | DIP8 | Час вимикання | 12нс |

Зворотні діоди

В якості зворотного діода було використано BYV26E з наступними технічними характеристиками [22] (Таблиця 3.4):

Таблиця 3.4 - Параметри BYV26E

| Параметр | Величина | <i>1</i> | <i>2</i> |
|-------------|--------------|----------------------|----------|
| <i>1</i> | <i>2</i> | Зворотна напруга мах | 1000В |
| Тип монтажу | ТНТ | Імпульсний струм | 30А |
| Виробник | VISHAY | Струм витоку | 100мкА |
| Тип діода | Випрямляючий | Прямий струм | 1А |

| | | | |
|-------------|-------|------------------------|-------|
| Тип корпусу | SOD57 | Падіння напруги мах | 1.3 В |
|-------------|-------|------------------------|-------|

Датчик струму

В якості датчик струму було обрано VJHCS-ES5A-50A з наступними технічними характеристиками [22] (Таблиця 3.1)

Таблиця 3.5 - Параметри VJHCS-ES5A-50A

| Параметр | Величина | 1 | 2 |
|-------------------|-----------|----------------------------|----------|
| 1 | 2 | Напруга живлення | 5В |
| Тип монтажу | ТНТ | Діапазон вимірювання | ±120А |
| Виробник | CORE TECH | Точність перетворення | ±0.5% |
| Номінальний струм | 50 А*Вит | Номінальна вихідна напруга | ±0.625 В |

Конденсатори для ємнісного фільтра

В якості конденсатора для ємнісного фільтра було обрано WIMA MKP10 на 1мкФ з наступними технічними характеристиками [22] (Таблиця 3.6):

Таблиця 3.6 - Параметри WIMA MKP10

| Параметр | Величина |
|------------------|----------|
| 1 | 2 |
| Тип монтажу | Виводний |
| Виробник | WIMA |
| Ємність | 1 мкФ |
| Змінна напруга | 400 В |
| Постійна напруга | 630 В |
| Точність | ±20 % |

Електролітичний конденсатор

В якості електролітичного конденсатора було обрано ЕСАР 47/100V з наступними технічними характеристиками [22] (Таблиця 3.7):

Таблиця 3.7 - Параметри ЕСАР 47/100V

| Параметр | Величина |
|--------------------|----------|
| <i>1</i> | <i>2</i> |
| Номінальна напруга | 100В |
| Ємність | 47 мкФ |
| Корпус | Radial |
| Тип монтажу | Виводний |

DC-DC перетворювач

В якості DC-DC перетворювач для живлення драйверів і контролера було обрано XL7015 з наступними технічними характеристиками [22] (Таблиця 3.8):

Таблиця 3.8 - Параметри XL7015

| Параметр | Величина |
|-----------------------------|--------------|
| <i>1</i> | <i>2</i> |
| Вхідна напруга | 5-80 В |
| Вихідна напруга | 5-20 В |
| Вихідний мах струм | 0.6 А |
| Частота перетворення | 150 kHz |
| ККД | +85% |
| Діапазон робочих температур | -40 ... 85°C |

На основі Рисунок 3.26 виконуємо збирання електрично-принципової схеми. На макетній платі розміщуємо електричні компоненти на своїх місцях, та за допомогою паяльної станції їх запаюємо. На Рисунок 3.27 можна побачити результуючий вигляд плати перетворювача у вигляді зверху, а на Рисунок 3.28 знизу. На цих рисунках досить добре видно розташування всіх електричних компонентів та їх підключення.

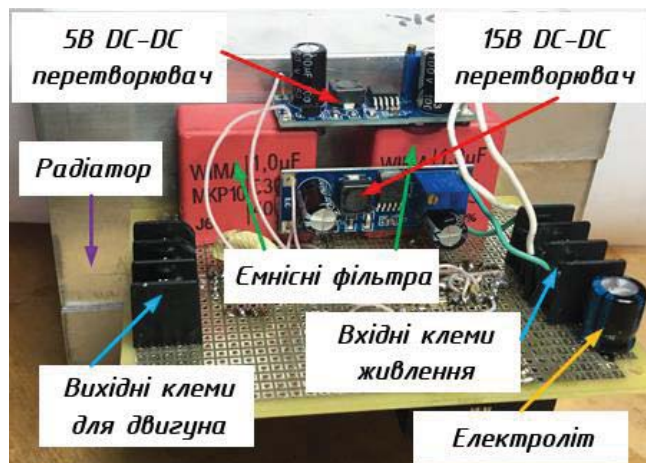


Рисунок 3.27 – Вигляд перетворювача зверху

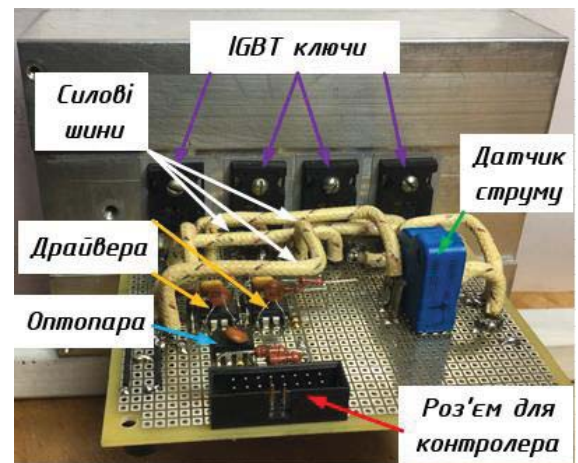


Рисунок 3.28 – Вигляд перетворювача знизу

На рисунку Рисунок 3.29 можна побачити як виглядатиме система керування в своєму завершеному вигляді. Основним джерелом живлення є акумуляторна батарея (АКБ), яка підключається через двополісний автоматичний вимикач на плату перетворювача. А з плати перетворювача напруга надходить на двигун постійного струму (ДПС). Сам перетворювач через шлейф підключається до контролера. До того ж контролера підключається і датчик струму і педаль газу. Датчик струму виступає зворотнім зв'язком для контролера, а педаль газу в якості задатчика.

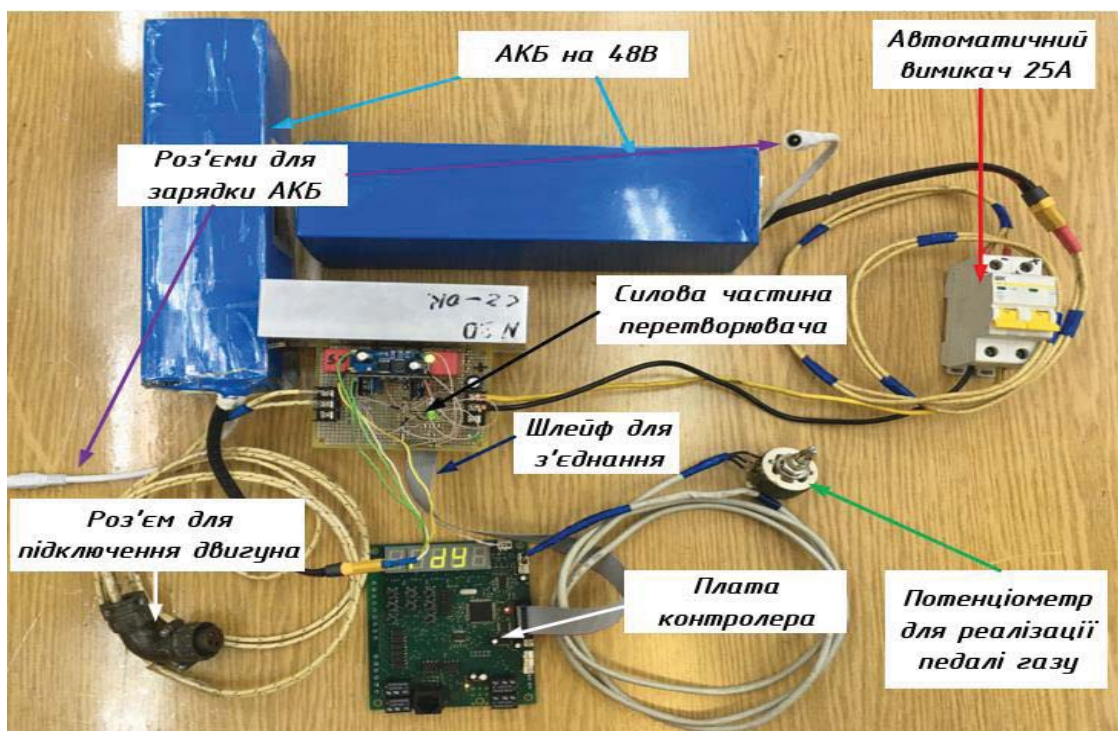


Рисунок 3.29 – Загальний вигляд системи керування в цілому

Висновок по розділу

В цьому розділі на основі ескізу було розроблено механічну частину електромобіля, і вже потім спроектовано його електричну частину.

Було розроблено функціональну схему, в якій за основу контролера було взято типовий сигнальний процесор TMS320LF2406A, а силова частина була розроблена на основі системи широтно-імпульсної модуляції.

На період проведення переддипломної практики командою ентузіастів, включно з керівником мого дипломного проекту, було спроектовано і розроблено конструкція малогабаритного електромобіля. На час завершення практики всі слюсарні роботи по електромобілю були завершені, а саме було виготовлено всю раму електромобіля, встановлено рульовий механізм, встановлено електродвигуни, передаточні механізми та встановлено систему гальмування. Пофарбували готову конструкцію ґрунтовкою для захисту від корозії.

На період написання дипломної роботи було спроектовано і розроблено електричну частину цього проекту. Після деяких випробувань було виготовлення силову частину перетворювача, потім все було підключено і почато процес програмування і налаштовані всі параметрів контролера.

4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

4.1. Розробка алгоритму регулювання швидкості двигуна

Математична модель ДПС з НЗ має вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \mu i - \frac{M_c}{J}; \\ \dot{i} &= L^{-1}(u - iR - c\omega).\end{aligned}\tag{4.1}$$

де i, ω - струм і кутова швидкість якоря; u - керуюча напруга якоря; M_c - момент навантаження; L, R - індуктивність і активний опір якорного кола; c - коефіцієнт моменту (проти ЕРС); J - сумарний момент інерції; $\mu = \frac{c}{J}$.

У випадку живлення ДПС від транзисторного перетворювача з достатньо високою частотою комутації ШІМ, інерційністю перетворювача можна знехтувати, вважаючи напругу u в (4.1) реальним керуючим впливом, тобто передаточна функція перетворювача $W(p) = 1$.

Розглянемо модель ДПС, задану рівняннями (4.1), припустимо, що:

- Задана траєкторія зміни кутової швидкості є обмеженою функцією часу з обмеженими, відомими першими двома похідними.
- Момент навантаження M_c - обмежений, постійний і невідомий.
- Параметри моделі (4.1) постійні і відомі.
- Змінними, що вимірюються, в рівнянні (4.1) є струм якоря та кутова швидкість.

Якщо ці припущення виконуються, то існує лінійний динамічний контролер по вимірюваному виходу в формі:

$$\begin{aligned}u &= a(\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*, i, \omega, z) \\ \dot{z} &= b(\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*, i, \omega, z)\end{aligned}\tag{4.2}$$

що забезпечує асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0; \quad \tilde{\omega} = \omega - \omega^* \quad (4.3)$$

Використовуючи концепцію керування в електромеханічних системах по оцінюваному прискоренню, що базується на зворотній по кроковій задачі проектування, спершу спроектуємо контур регулювання кутової швидкості.

Перше рівняння в (4.1) в формі похибок відпрацювання має вигляд

$$\tilde{\omega} = \mu i - \hat{M}_c - \tilde{M}_c - \dot{\omega}^* \quad (4.4)$$

де \hat{M}_c - оцінене значення; $\frac{M_c}{J}$; похибка оцінювання; $\tilde{M}_c = \frac{M_c}{J} - \hat{M}_c$.

У випадку ідеального струмового керування при $M_c = \text{const}$, алгоритм регулятора швидкості формується як пропорційно – інтегральний:

$$\begin{aligned} i^* &= \frac{1}{\mu} \left[-k_{\omega} \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* \right] \\ \dot{\hat{M}}_c &= -\dot{\tilde{M}}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (4.5)$$

де $(k_{\omega}, k_{\omega i}) > 0$ - коефіцієнти пропорційної і інтегральної складових регулятора швидкості.

Ідеальна динаміка контуру регулювання швидкості (при регулюванні струмом) має вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \\ \dot{\tilde{\omega}} &= -\tilde{M}_c - k_{\omega} \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Система (4.6) асимптотично стійка для всіх $k_{\omega}, k_{\omega i} > 0$, тобто:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{M}_c, \tilde{\omega})^T = 0$$

а її динамічна поведінка задається за допомогою коефіцієнта демпфування ξ і власної частоти недемпфованих коливань ланки 2-го порядку, що відповідає рівнянню (4.6). Струм якоря в (4.4) не є реальною керуючою дією, тому закон його зміни (4.5) можна розглядати як заданий i^* для струму якоря. Визначивши похибку відпрацювання струму у вигляді:

$$\tilde{i} = i - i^* \quad (4.7)$$

Рівняння (4.6) приймуть вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \\ \dot{\tilde{\omega}} &= -\tilde{M}_c - k_{\omega} \tilde{\omega} + \mu \tilde{i} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Керуюча напруга якоря u повинна бути сконструйована таким чином, щоб гарантувати асимптотичне відпрацювання заданого струму $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i} = 0$.

Динамічна поведінка контуру задається вибором коефіцієнтів пропорційної та інтегральної складових $k_{\omega}, k_{i\omega}$ регулятора швидкості.

Використовуючи характеристичне рівняння:

$$p^2 + k_{\omega} p + k_{i\omega} = 0$$

отримуємо співвідношення між інтегральною і пропорційною складовими регуляторів:

$k_{i\omega} = \frac{k_{\omega}^2}{4}$ - при коефіцієнті демпфування $\xi = 1$, або $k_{i\omega} = \frac{k_{\omega}^2}{2}$ - при $\xi = 0.707$.

При використанні регулятора струму заданого рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{i}_1^* &= \frac{1}{\mu} \left[-k_{\omega} (-k_{\omega} \tilde{\omega} + \mu \tilde{i}) + \dot{\tilde{M}}_c + \dot{\tilde{\omega}}^* \right] \\ \dot{i}_2^* &= \frac{k_{\omega}}{\mu} \tilde{M}_c \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned}
 u &= L\left(\frac{R}{L}i^* + \frac{c}{L}\omega + \dot{i}_1^* - k_{i1}\tilde{i} - y\right) \\
 \dot{y} &= k_{ii}\tilde{i}
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Динаміка похибок відпрацювання композитної системи запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned}
 \dot{\tilde{\omega}} &= -\tilde{M}_c - k_{\omega}\tilde{\omega} + \mu\tilde{i} \\
 \dot{\tilde{M}}_c &= k_{\omega i}\tilde{\omega} \\
 \dot{\tilde{i}} &= -y - k_i\tilde{i} - \frac{k_{\omega}}{\mu}\tilde{M}_c \\
 \dot{y} &= k_{ii}\tilde{i}
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

де $k_i = -\frac{R}{L} + k_{i1}$.

Регулятор швидкості задається рівняннями (4.5)

$$\begin{aligned}
 i^* &= \frac{1}{\mu} \left[-k_{\omega}\tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* \right] \\
 \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i}\tilde{\omega}
 \end{aligned}$$

а його структурна схема представлена на Рисунок 4.1

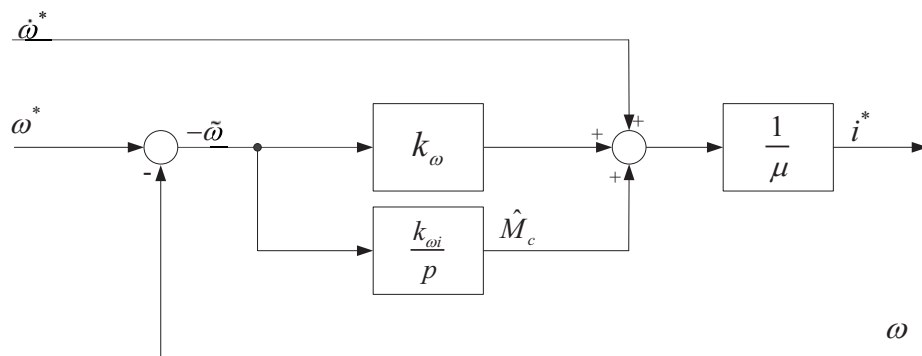


Рисунок 4.1 – Структурна схема регулятора швидкості

Для випадку застосування регулятора струму (4.9), (4.10) в системі регулювання кутової швидкості, результуючі рівняння алгоритму керування набувають вигляду:

$$\begin{aligned}
i^* &= \frac{1}{\mu} \left[-k_{\omega} \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* \right] \\
\dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \\
u &= L \left(\frac{R}{L} i^* + \frac{c}{L} \omega + \dot{i}_1^* - k_{i1} \tilde{i} - y \right) \\
\dot{y} &= k_{ii} \tilde{i} \\
\dot{i}_1^* &= \frac{1}{\mu} \left[-k_{\omega} \left(-k_{\omega} \tilde{\omega} + \mu \tilde{i} \right) + \dot{\hat{M}}_c + \dot{\omega}^* \right]
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Повна структурна схема системи керування швидкістю ДПС з НЗ представлена на Рисунок 4.2.

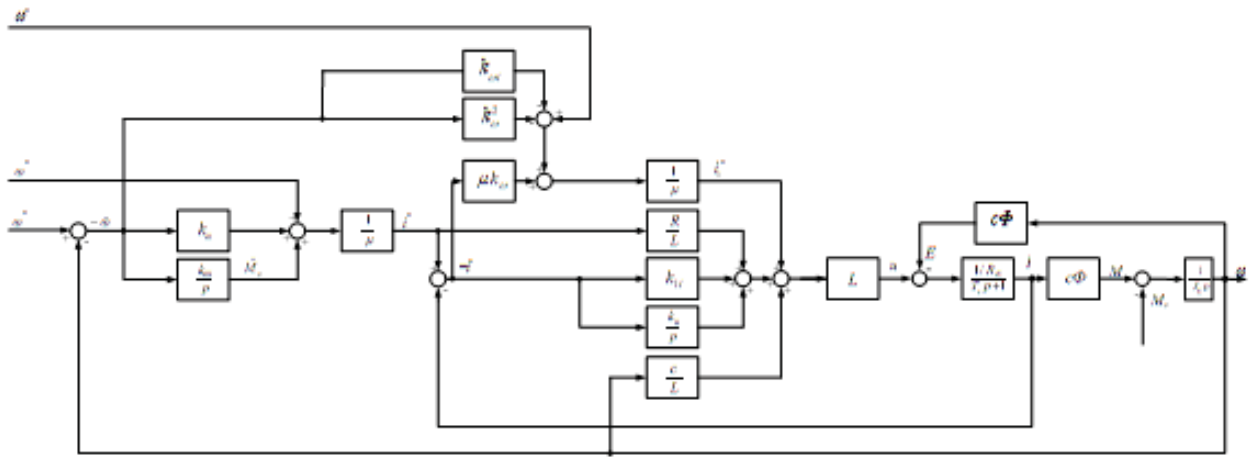


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи керування швидкістю ДПС з НЗ

Структура системи рівнянь (4.11) відображає каскадні властивості спроектованої системи: рівняння описують ідеалізовану динаміку контурів регулювання швидкості і струму. Дві підсистеми: регулювання струму і швидкості, - ввімкнені в контурі від'ємного зворотного зв'язку, з коефіцієнтом k_{ω} .

Використовуючи стандартну процедуру по розділенню у часі процесів керування у зовнішньому та внутрішньому контурі, встановлюємо співвідношення частот власних недемпфованих коливань

$$\omega_{0i} = (2..4)\omega_{0s}, \omega_0^2 = k_{ip},$$

де індекси i, s відносяться, відповідно, до контуру регулювання струму і швидкості.

Рівняння результуючої динаміки похибок відпрацювання (4.11) при розглянутому налаштуванні мають принципову структурну грубість у відношенні координатних і параметричних збурень, оскільки відповідають каскадному ввімкненню систем 2-го порядку із динамікою, що вільно задається та дворівневим розділенням процесів у часі. Відмітимо, що структура спроектованої системи має таку ж базову конфігурацію, як і стандартні системи з підпорядкованим регулюванням координат. Різниця ж полягає у введенні додаткових корегуючих зв'язків по завданню і його похідним, а також додаткових зв'язків між контуром регулювання швидкості і струму. Система відпрацьовує задану траєкторію зміни швидкості без похибки при нульових початкових умовах. Обмеження координат здійснюється аналогічним стандартним системам з підпорядкованим регулюванням, шляхом обмеження керуючої дії i^* і додатковим прирівнянням нулю похідної \dot{i}^* в (4.10).

4.2. Розробка програмного забезпечення

4.2.1. Особливості реалізації алгоритмів керування з використанням цілочисельної арифметики

Розглянемо загальні принципи цілочисельної арифметики, застосовані для розрахунку алгоритмів керування. Розглядаючи двійкову форму подання чисел, будемо вважати, що молодший біт знаходиться праворуч.

Як відомо, всі цифрові сигнальні процесори сімейства C2000 (TMS320LF2407A, TMS320LF2406A і ін.) є 16 розрядними пристроями, які виконують операції з фіксованою комою.

Відомо, що в двійковій формі будь-яке ціле знакове число інтерпретується як:

$$X = -b_{15} \cdot 2^{15} + b_{14} \cdot 2^{14} + \dots b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0 \quad (4.13)$$

де $b_0, b_1, \dots, b_{14}, b_{15}$ відповідні біти числа X представленого в двійковому вигляді.

Як випливає з (4.13) число X може приймати цілочисельне значення від -32768 до $+32768$. Якщо ж потрібно записати не ціле число, а дріб, то рівняння (4.13) модифікується, наприклад, до вигляду:

$$X = b_{15} \cdot 2^{11} + b_{14} \cdot 2^{10} + \dots + b_6 \cdot 2^2 + b_5 \cdot 2^1 + b_4 \cdot 2^0 + b_3 \cdot 2^{-1} + b_2 \cdot 2^{-2} + b_1 \cdot 2^{-3} + b_0 \cdot 2^{-4} \quad (4.14)$$

тобто дане число віртуально розбивається на дві половини: цілу частину (ступінь при двійці ≥ 0) і дробову частину (ступінь при двійці від'ємна < 0). При цьому мікропроцесор «не знає» про те, що це число дріб, він працює з ним як з цілим числом. Від того в якому місці (починаючи від молодшого біта) стоїть віртуальна кома залежить формат представлення числа.

Розглянемо приклад. Нехай задано цілочисельне двійкове число (віртуальна кома стоїть справа)

0000 0000 0000 1100,

тоді кажемо, що це десяткове число:

$$2^3 + 2^2 + 0 + 0 = 12$$

число записане у форматі Q(0), тобто на дробову частину виділено 0 біт. Перемістивши віртуальну кому на чотири розряди вліво

(0000 0000 0000 ,1100),

згідно з формулою (4.14) отримаємо десяткове число:

$$0 + 2^{-1} + 2^{-2} + 0 + 0 = 0.75$$

у форматі Q(4). Як видно з прикладу, двійкове представлення числа не змінилося, а його десятковий еквівалент став іншим.

У сучасній літературі по цифровій обробці сигналів можна зустріти два види представлення форматів чисел: Q-формат і D-формат. При цьому індекс Q-формату визначається кількістю бітів, виділених на дробову частину числа. Індекс D-формату визначається кількістю бітів, виділених на цілу частину числа. Іншими словами, якщо в 16 розрядному слові один біт виділяється на

знак, 4 біта на дробову частину, то говорять що це формат Q(4), або те ж саме що D(11).

Слід зазначити, що при підвищенні індексу Q формату, точність представлення числа збільшується, а діапазон його можливої зміни зменшується. У Таблиця 4.1 приведені дані про точність і діапазони зміни чисел записаних у форматах Q(0) – Q(15).

Таблиця 4.1 – Дані про точність і діапазон зміни чисел

| Q-формат | Точність | Діапазон зміни числа |
|----------|-------------|----------------------|
| 0 | 1 | ± 32768 |
| 1 | 0,5 | ± 16384 |
| 2 | 0,25 | ± 8192 |
| 3 | 0,125 | ± 4096 |
| 4 | 0,0625 | ± 2048 |
| 5 | 0,03125 | ± 1024 |
| 6 | 0,015625 | ± 512 |
| 7 | 0,0078125 | ± 256 |
| 8 | 0,00390625 | ± 128 |
| 9 | 0,001953125 | ± 64 |
| 10 | 0,000976563 | ± 32 |
| 11 | 0,000488281 | ± 16 |
| 12 | 0,000244141 | ± 8 |
| 13 | 0,00012207 | ± 4 |
| 14 | 6,10352E-05 | ± 2 |
| 15 | 3,05176E-05 | ± 1 |

Правило запису числа в певному форматі: якщо потрібно перевести дробове число X в цілочисельне представлення Y у форматі F , застосовується формула:

$$Y = X \cdot 2^F \quad (4.15)$$

З розглянутого раніше прикладу: $X=0.75$, $F=4$, $Y=0.75 \cdot 2^4=10$. Зворотнє перетворення здійснюється також за допомогою формули (4.15) записаною відносно X .

Правила розрахунку форматованих змінних:

- формат результату при множенні змінних дорівнює сумі їх форматів;
- формат результату при діленні дорівнює різниці ділимого і дільника;
- складання і віднімання чисел повинні відбуватися з однаковими форматами.

4.2.2. Формати змінних

До Таблиця 4.2 зведені регульовані координати, параметри двигуна, діапазони їх зміни та відповідні формати представлення їх значень.

Таблиця 4.2 – Зведені дані

| Параметр | Діапазон зміни числа | Q-формат |
|---|----------------------|----------|
| Кутова швидкість, ω , рад/с | -500..500 | Q(5) |
| Струм, i , А | -10..10 | Q(10) |
| Напруга, u , В | -1000..1000 | Q(5) |
| Активний опір якоря, $R_{я}$, Ом | 0..10 | Q(10) |
| Індуктивний опір якоря, $L_{я}$, Гн | 0..1 | Q(12) |
| Коефіцієнт протиЕРС, $c\Phi$, Вс | 0..1 | Q(15) |
| K_i | 0..500 | Q(5) |
| K_{ii} | 0..125000 | Q(5) |
| $K\omega$ | 0..50 | Q(8) |
| $K\omega_i$ | 0..1250 | Q(4) |

4.2.3. Програмна реалізація алгоритму керування швидкістю

Використовуючи рівняння (4.12), алгоритму керування, запишемо відповідні вирази, які реалізуються програмно в мікроконтролері [23]. Відмітимо, що компенсації $\ddot{\omega}^*$, \dot{i}_1^* до алгоритму не вводиться, оскільки задана швидкість є траєкторією першого порядку. Тоді, рівняння алгоритму керування приймуть вигляд:

$$\begin{aligned} i^* &= \frac{1}{\mu} \left[-k_{\omega} \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* \right] \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \\ u &= L \left(\frac{R}{L} i^* + \frac{c}{L} \omega - k_{li} \tilde{i} - y \right) \\ \dot{y} &= k_{ii} \tilde{i} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Для спрощення даного виразу, розкриємо дужки і введемо допоміжні коефіцієнти. Рівняння приймуть вигляд:

$$\begin{aligned} i^* &= -K_1 \omega + X + K_3 \omega^* \\ u &= R i^* + c \omega - K_2 \tilde{i} - Y \end{aligned} \quad (4.17)$$

де $K_3 = 1/\mu$; $K_1 = K_{\omega} K_3$; $K_2 = L K_{li}$; $X = K_3 M_c$; $Y = L y$.

Інтегральні складові регуляторів струму і швидкості перетворимо у розрахункову форму за методом Ейлера. Рівняння інтегральної складової регулятора швидкості запишемо у вигляді:

$$\frac{dX}{dt} = -K_3 k_{\omega i} \tilde{\omega} \quad (4.18)$$

У формі приростів (4.18) запишеться

$$\frac{X_{k+1} - X_k}{T_s} = -K_3 k_{\omega i} \tilde{\omega} \quad (4.19)$$

Звідки отримуємо:

$$X_{k+1} = -K_5 \tilde{\omega} + X_k \quad (4.20)$$

де $K_5 = K_3 \cdot K_{\omega} \cdot T_s$.

Аналогічно, для інтегральної складової регулятора струму отримуємо:

$$Y_{k+1} = K_4 \tilde{i} + Y_k \quad (4.21)$$

де $K_4 = L \cdot K_{ii} \cdot T_s$.

Визначимо формати складових рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_3 = \frac{1}{\mu} = K_3(Q15) \\ K_1 = (-K_{\omega}(Q8) \cdot K_3(Q15)) \gg 10 = K_1(Q13) \\ K_2 = -L(Q15)k_{ii}(Q5) = K_2(Q20) \gg 15 = K_2(Q5) \\ K_4 = -Lk_{ii}T_s = K_4(15) \\ K_5 = (-K_3(Q15) \cdot K_{\omega i}(Q4) \gg 10) \cdot T_s(Q15) \gg 10 = K_5(Q14) \\ Ri^* = R(Q10)i^*(Q10) = Ri^*(Q20) \\ c\omega = c(Q15)\omega(Q5) = c\omega(Q20) \\ K_2 \tilde{i} = K_2(Q5)\tilde{i}(Q10) = K_2 \tilde{i}(Q15) \\ K_4 \tilde{i} = K_4(Q15)\tilde{i}(Q10) = K_2 \tilde{i}(Q25) \\ K_3 \dot{\omega}^* = K_3(Q15)\dot{\omega}^*(Q5) = K_3 \dot{\omega}^*(Q20) \\ K_1 \tilde{\omega} = K_1(Q13)\tilde{\omega}(Q5) = K_1 \tilde{\omega}(Q18) \\ K_5 \tilde{\omega} = K_5(Q14)\tilde{\omega}(Q5) = K_5 \tilde{\omega}(Q19) \end{array} \right. \quad (4.22)$$

Запис алгоритму керування на мові програмування С матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} e\omega = \omega - \omega_{ref} \\ I_{ref} = -(K_1 * \tilde{\omega} \gg 8) + (K_3 * d\omega_{ref} \gg 10) + X_k \\ X_k = X_k - (K_5 * e\omega \gg 9) \\ ei = i - i_{ref} \\ U_{ref} = (R * i_{ref} \gg 15) + (c * \omega \gg 15) - (K_2 * ei \gg 5) - Y_k \\ Y_k = Y_k + (K_4 * ei \gg 15) \end{array} \right. \quad (4.23)$$

де $\omega_{ref} = \omega^*$, $d\omega_{ref} = \dot{\omega}^*$, $e\omega = \tilde{\omega}$, $ei = \tilde{i}$, $I_{ref} = i^*$, $U_{ref} = u$.

При розімкненому алгоритмі керування задана напруга формується згідно виразу:

$$U_{ref} = c \cdot \omega_{ref} \quad (4.24)$$

4.3. Математичне моделювання

На основі рівнянь алгоритму керування (4.12) та рівнянь (4.2), що описують двигун, в пакеті MATLAB 2009 (Simulink) створена математична модель системи керування швидкості ДПС з НЗ. Відмітимо, що для практичної реалізації системи застосовувались рівняння алгоритму (4.12) при відсутніх компенсаціях по $\ddot{\omega}^*$ та \dot{i}_1^* , тому вирази (4.12) відповідним чином зміняться.

Моделювання здійснювалось для наступної послідовності керування:

- Від двигуна вимагається відпрацювати задану траєкторію швидкості першого порядку, що починається з нульового значення і досягає заданої величини $\omega^* = 100$ рад/с з першою похідною рівною 100 рад/с²;
- в процесі роботи двигуна з постійною швидкістю до його валу прикладається і знімається постійний момент навантаження, близький до номінального моменту двигуна, $M_c \approx 3.5$ Нм.

Таблиця 4.3 – Параметри двигуна

| Параметр | Умовне позначення | Експеримент |
|---|------------------------|-------------|
| Сумарний активний опір якірного кола | $R_{я\Sigma}$, Ом | 4.28 |
| Сумарний індуктивний опір якірного кола | $L_{я\Sigma}$, Гн | 0.0728 |
| Стала часу якірного кола | $T_{я}$, с | 0.017 |
| Коефіцієнт проти ЕРС | $c\Phi$, Вс | 0.9 |
| Момент інерції | J , кгм ² | 0.0106 |

Графіки перехідних процесів, при значеннях коефіцієнтів регуляторів $k_\omega = 50$, $k_{\omega i} = 625$, $k_i = 500$, $k_{ii} = 125000$, показані на Рисунок 4.4 та Рисунок 4.3.

Приведені графіки свідчать про високі статичні та динамічні показники якості регулювання швидкості.

Параметри двигуна, визначені по паспортним даним і експериментальним шляхом, зведені в Таблиця 4.3.

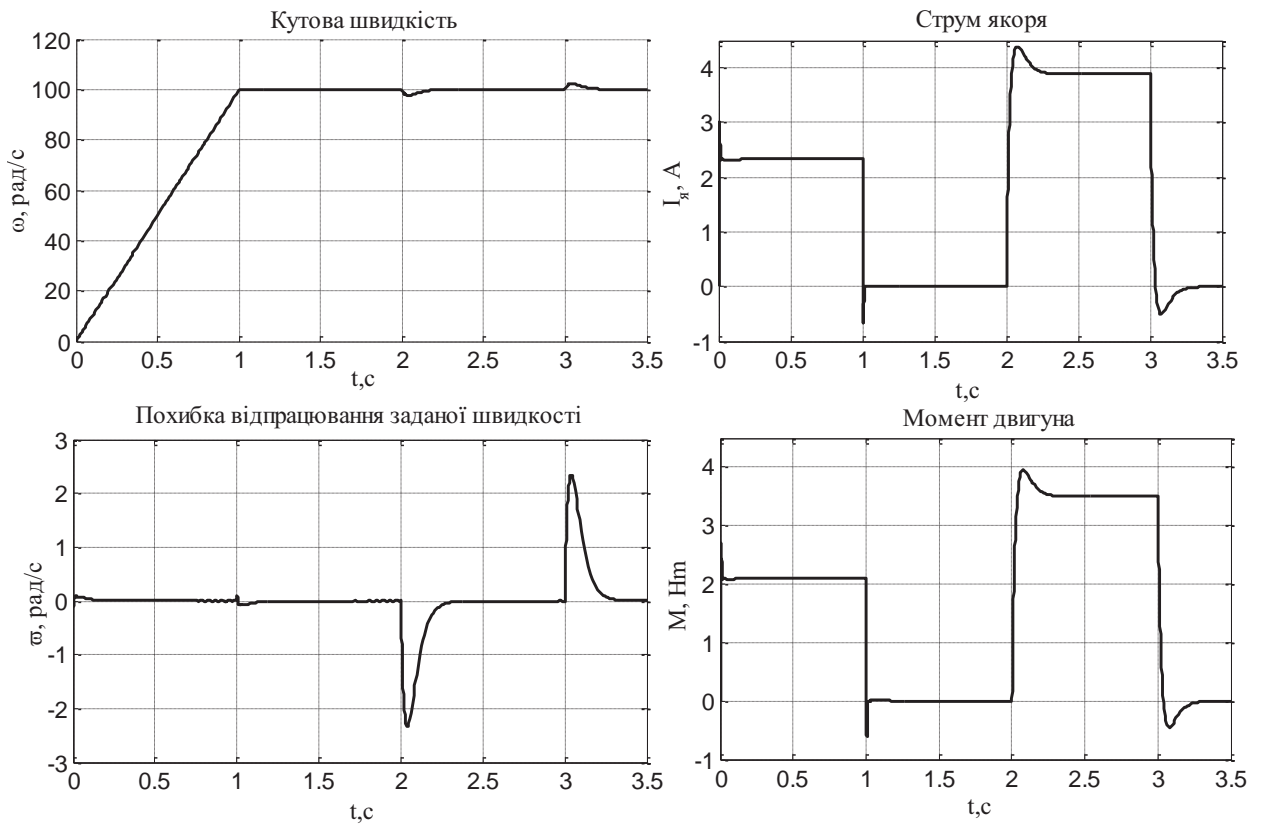


Рисунок 4.3 – Графіки перехідних процесів

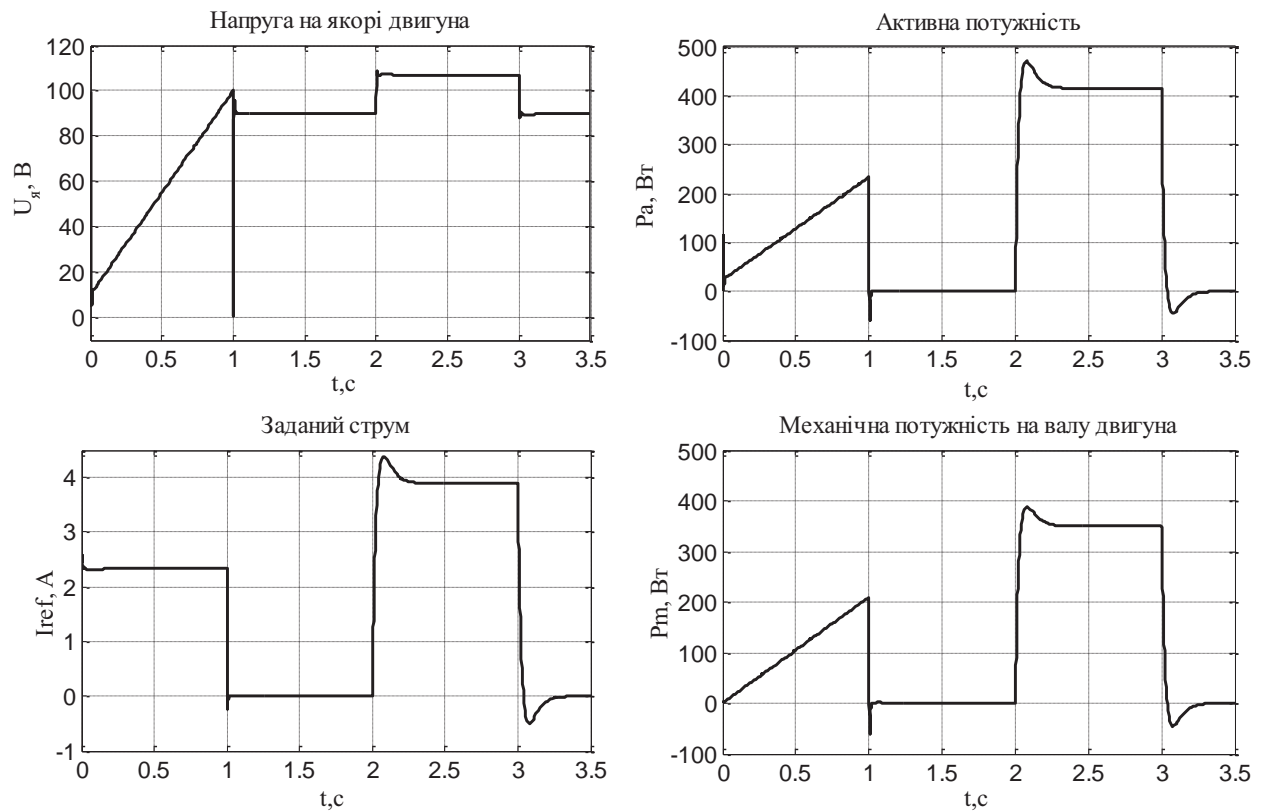


Рисунок 4.4 – Графіки перехідних процесів

4.4. Розробка системи широтно-імпульсного перетворювача-двигун (ШІП-Д)

Функціональну схему ШІП-Д (Рисунок 4.5) для керування ДПС розробляємо на основі системи широтно-імпульсної модуляції. Для початку необхідно розібратись з тим як же вона повинна працювати. Працюючи в режимі перемикання з високою частотою, транзисторні перетворювачі є практично без інерційними, мають кращі динамічні показники ніж тиристорні перетворювачі і успішно замінюють їх в електроприводах малої потужності.

Існує декілька способів керування ключами інвертора, а саме: при симетричному і несиметричному керуванні.

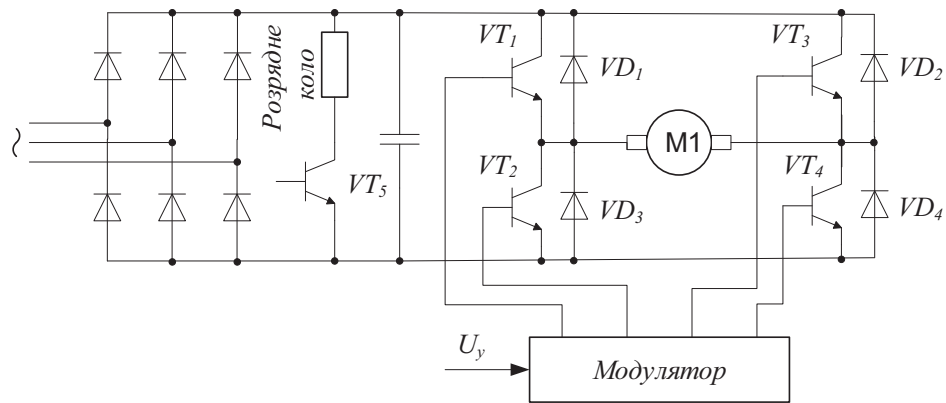


Рисунок 4.5 – Схема перетворювачу ШІМ

При симетричному способі керування, силові транзистори комутуються попарно і в проти фазі. В стані перемикання перебувають всі чотири транзисторних ключа моста, а напруга на виході перетворювача являє собою знакозмінні імпульси, довжина яких регулюється вхідним сигналом. Як видно з Рисунок 4.6 імпульси відпираючої напруги поступають на бази діагональних транзисторів VT1 і VT4 в проміжок часу t_1 , а транзистори VT2 і VT3 при цьому закриті. Середні значення напруги Рисунок 4.7, що прикладається до якоря двигуна, визначається інтервалом ввімкнення:

$$\tau_1 = \frac{t_1}{T} \quad (4.25)$$

За другу частину періоду комутації пара транзисторів VT1 і VT4 закриваються, а відкриваються транзистори VT2 і VT3. Якщо струм двигуна при цьому не змінює знак, то в проміжку часу $(T - t_1)$ струм протікає через діоди транзисторів VT2 і VT3. Середнє значення напруги, що прикладається до якоря двигуна, визначається виразом:

$$U = (2\tau_1 - 1)U_{dc} \quad (4.26)$$

де U_{dc} - напруга на виході АКБ. При $\tau_1 = 0.5$ середнє значення напруги перетворювача дорівнює нулю.

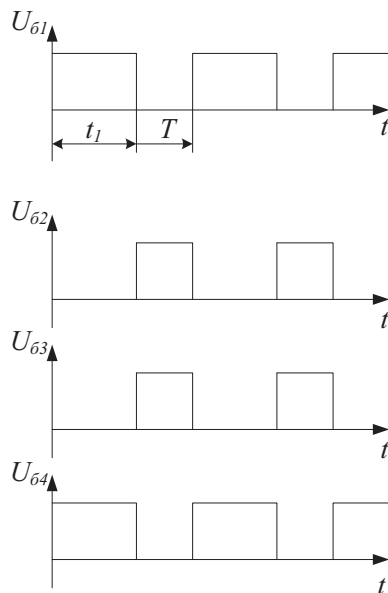


Рисунок 4.6 – Діаграми напруги транзистора

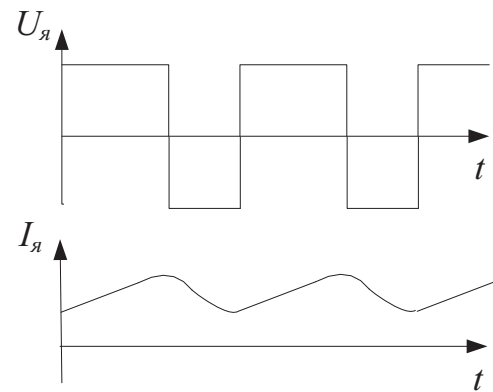


Рисунок 4.7 – Діаграми напруги і струму двигуна

Механічні характеристики електродвигуна для неперервного струму описується рівнянням:

$$\omega = \omega_0 (2\tau_1 - 1) - \frac{R_{я}}{c} M \quad (4.27)$$

де $\omega_0 = \frac{U_{dc}}{c}$; $R_{я}$ - опір якорного кола; c - коефіцієнт проти ЕРС.

Зона перервних струмів визначається граничними значеннями струму і швидкості двигуна:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{я} = \frac{U_{dc}}{R_{я}} \frac{\tau_1(1-\tau_1)}{\tau_{я}}; \\ \tau_{я} = \frac{T_{я}}{T}; \\ \omega_{zp} = \omega_0 \left[(2\tau_1 - 1) - \frac{2(1-\tau_1)\tau_1}{2\tau_{я} - 1} \right] \end{array} \right. \quad (4.28)$$

Симетричний спосіб керування зазвичай використовується в малопотужних електроприводах постійного струму. Його переваги – простота

реалізації і відсутність зони нечутливості в регульовальній характеристиці. Недоліком перетворювачів з симетричним керуванням є підвищений рівень пульсацій струму якоря, оскільки напруга на якорі двополярна. Це призводить до додаткового нагріву двигуна.

В електроприводах більшої потужності використовується несиметричне керування. Діаграми напруг для цього випадку зображені на Рисунок 4.8. Транзисторні ключі VT3 і VT4 перемикаються (VT1 і VT2 при протилежній полярності вхідного сигналу), VT1-постійно відкритий, VT2-постійно закритий. Транзистори VT3 і VT4 перемикаються в протифазі і спільно з діодом VD2 забезпечують протікання струму від протиЕРС двигуна.

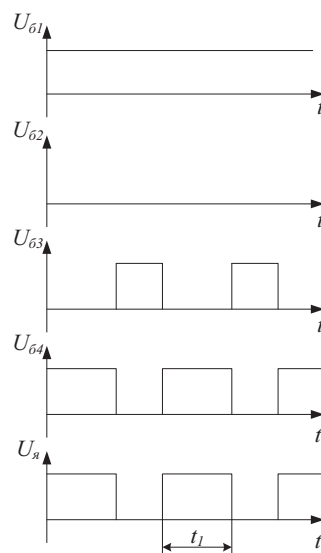


Рисунок 4.8 - Діаграми напруг перетворювача при несиметричному керуванні

Сучасні транзисторні перетворювачі з ШІМ мають частоту комутації до декількох десятків кілогерц. Підвищення частоти перемикань сприяє звуженню зони перервних струмів і зменшенню впливу дискретності роботи перетворювача, але призводить до збільшення втрат потужності в інверторі. Також рекомендується встановлювати частоту комутації більше 20кГц для того щоб зменшити акустичний шум який виникає в перетворювачі та двигуні.

Реалізовувати ШІМ на основі центрального сигнального процесора (ЦСП) TMS320F2406A який використовується в нашому контролері. Для генерування імпульсів керування ключами з допомогою ШІМ необхідно

порівнювати сигнал завдання з пилкоподібним сигналом, як показано на Рисунок 4.9.

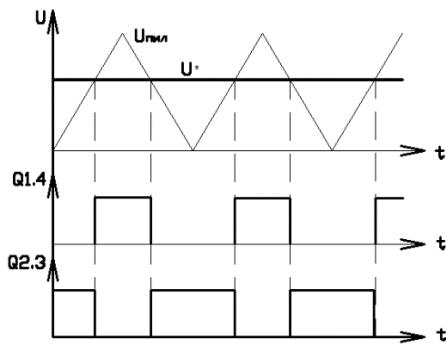


Рисунок 4.9 – Діаграма імпульсів керування ключами

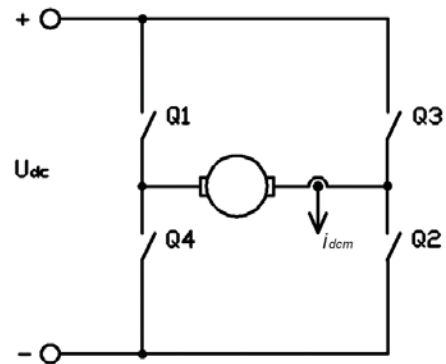


Рисунок 4.10 – Спрощена принципова схема живлення двигуна

В результаті порівняння, при симетричному способі керування, отримуються два імпульси керування, які необхідно подавати попарно на ключі Q1,Q4 і Q2,Q3 показано на Рисунок 4.10.

В ЦСП пилкоподібний сигнал формується за допомогою таймера, який підраховує імпульси тактової частоти. Довжина одного імпульсу складає $T_{CPU} = 25(нс)$. Для порівняння отриманого пилкоподібного отриманого сигналу із заданим використовуються регістри порівняння CMPR1, CMPR2, в результаті чого на виході процесора формуються чотири імпульси керування ключами, тобто кожний регістр порівняння забезпечує формування двох імпульсів для одного ключа інвертора.

Нехай частота комутації ключів складає $f_{PWM} = 10(кГц)$. Тоді період ШІМ :

$$T_{PWM} = \frac{1}{f_{PWM}} = 100(мкс) \quad (4.29)$$

Кількість тактів процесора, яка відповідає періоду ШІМ дорівнює:

$$N_{CPU} = \frac{T_{PWM}}{T_{CPU}} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-9}} = 8000 \quad (4.30)$$

Враховуючи, що таймер в режимі наростаючої/спадаючої лічби, необхідно визначити максимальне значення до якого він повинен рахувати в режимі наростаючої лічби. Це значення називається періодом таймера:

$$TimerPeriod = \frac{N_{CPU}}{2} = 4000 \quad (4.31)$$

Таким чином таймер формує пилкоподібний сигнал показаний на Рисунок 4.11.

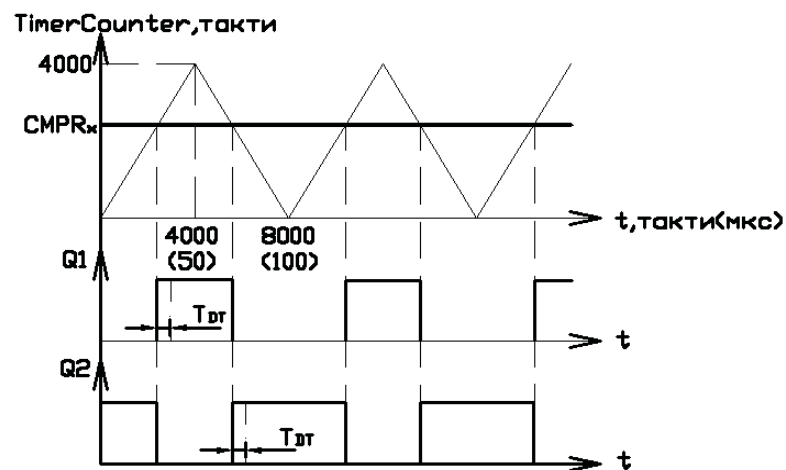


Рисунок 4.11 – Діаграма імпульсів керування ключами

Очевидно, що для отримання нульової середньої напруги на виході інвертора, сигнал завдання в регістрах порівняння повинен дорівнювати:

$$CMPR_x = \frac{TimerPeriod}{2} = 2000 \quad (4.32)$$

Отже, максимальне додатне і від'ємне значення вихідної напруги буде отримано при значеннях:

$$\begin{cases} CMPR_x = 4000 \\ CMPR_x = 0 \end{cases} \quad (4.33)$$

Перетворення заданої напруги U^* у значення, яке необхідно завантажувати в реєстри порівняння виконується по формулі:

$$CMPR_x = \frac{U^*}{U_{dc}} \frac{TimerPeriod}{2} + \frac{TimerPeriod}{2} \quad (4.34)$$

Оскільки реальні ключі мають кінцевий час відкривання і закривання, то при миттєвій зміні імпульсів керування в одному плечі інвертора може виникнути ситуація, коли другий ключ починає відкриватися при незакритому першому ключі, що призведе до наскрізного короткого замикання в плечі інвертора. Щоб усунути цей ефект, вводиться «мертвий час». Для цього сформовані імпульси керування на виході реєстра порівняння додатково проходять через генератор мертвого часу, який формує затримку T_{DT} (мертвий час) між командами на вимикання одного ключа і вмикання іншого, як показано на Рисунок 4.11 пунктиром.

Висновок по розділу

В даному розділі виконано розробку системи керування для електромеханічної системи електромобіля. Було розроблено алгоритм для регулювання швидкості двигуна, який дозволяє системі відпрацьовувати задану траєкторію зміни швидкості без похибки при нульових початкових умовах.

Розглянуто приклади розробки програмного забезпечення для алгоритмів керування з використанням цілочисельної арифметики, формати змінних і реалізація алгоритму керування швидкістю.

На основі рівнянь алгоритму керування що описують двигун постійного струму була створена математична модель ДПС з НЗ в MATLAB (Simulink) 2009. Було проведено моделювання номінальних параметрів двигуна, а саме накидання номінального моменту двигуна при номінальній частоті обертання. Графіки моделювання свідчать про високі статичні та динамічні показники якості регулювання швидкості.

Було розглянуто принцип роботи системи ШП-Д, яка реалізована на основі ШІМ. Розглянуто можливість програмування ШІМ на ЦСП TMS320LF2406A, який встановлений в нашому контролері, а також його особливості.

5. НАПИСАННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

Розроблений та описаний електромеханічної системи малогабаритного електромобіля, налаштувати та впровадити як продукцію (товар) масового виробництва для подальшого використання в промислових чи індивідуальних потреб. Використання такого товару допоможе користувачам зекономити кошти на паливі, використовуючи електропривід, тим самим підвищити енергоефективність транспортного засобу. Цей розділ представить маркетингові аспекти створення подібного стартап-проекту [24]. Опис ідеї товару, його переваги та недоліки представлені у Таблиця 5.1 та Таблиця 5.2.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї проекту

| <i>Зміст ідеї</i> | <i>Напрямки застосування</i> | <i>Вигоди для користувача</i> |
|--|---|--|
| Пропонується розробка електромеханічної системи малогабаритного електромобіля, для відпрацювання і дослідження основних фізичних процесів які виникають в процесі керування електромобілем, і створенням готової системи для подальшої популяції даного проекту, та можливості масштабування його в межах теми електромобілів і тд.. | 1. Виготовлення готових комплектів для самостійного виготовлення чи переобладнання в електромобіль. | Можливість самостійно зробити електромобіль, взявши за основу автомобіль з ДВЗ. |
| | 2. Технічна інформація про напрацювання над готовим продуктом і ПЗ. | Економія часу та коштів при використанні готових технологій і принципів дії. |
| | 3. Комерційна пропозиція для виготовлення серійних малогабаритних електромобілів. | Економія на пальному, швидке і легке пересування в місті, відсутність викидів вуглекислого газу. |

Таблиця 5.2 – Визначення різних характеристик ідеї проекту

| № п/ п | Техніко- економічні характеристи ки ідеї | (потенційні) товари/концепції конкурентів | | | | W (слабк а сторо на) | N (нейтр альна сторон а) | S (сил ьна сто рона) |
|--------------|---|--|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | Мій проект | Конкур ент1 | Конкур ент2 | Конку рент3 | | | |
| 1. | Легкість виготовлення конструкції | Так | Ні | Ні | Ні | | | + |
| 2. | Простота конструкції | Так | Ні | Ні | Так | | + | |
| 3. | Компакт- ність (масо- габаритні показники) | Так | Ні | Ні | Так | | + | |
| 4. | Комфортніст ь, та наявність різних девайсів | Ні | Так | Так | Так | + | | |
| 5. | Собівартість | Низь- ка | Висока | Висока | Висока | | | + |

Після проведеного аналізу переваг та недоліків потенційного проекту можливо зробити його оцінку як конкурентоспроможним.

Для реалізації ідеї проекту було проведено аудит для створення товару, результати якого занесені в табл. 6.3.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

| № n/n | Ідея проекту | Технології її реалізації | Наявність технологій | Доступність технологій |
|---|--|---|-------------------------|---------------------------|
| 1. | Виробництво готових комплектів для самостійного створення електротранспортних засобів, або переобладнання транспортних засобів на електричний. | Розробка технічної документації для заводської реалізації поставленого завдання | Необхідно розробити | Доступна |
| | | Виготовлення готових комплектів з використанням простих і доступних елементів. | Наявна | Доступно |
| 2. | Виготовлення серійних малогабаритних електромобілів | Виготовлення електромобіля заводським методом, на основі технічної документації | Необхідно розробити | Доступна |
| | | Виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів | Наявна | Доступна |
| Обрана технологія реалізації ідеї проекту: виготовлення готових комплектів з використанням простих і доступних елементів чи виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів, оскільки такі технології є доступними, та при певних напрацюваннях можуть виконуватися розробником проекту. | | | | |

Аналіз ринкових можливостей запуску проекту представлено у

Таблиця 5.4 - Таблиця 5.13.

Таблиця 5.4 – Характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| <i>№ n/ n</i> | <i>Показники стану ринку (найменування)</i> | <i>Характеристика</i> |
|-----------------------|--|-----------------------|
| 1 | Кількість головних гравців, од | 3 |
| 2 | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од | 100000 |
| 3 | Динаміка ринку (якісна оцінка) | Зростає |
| 4 | Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень) | Немає |
| 5 | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації | Немає |
| 6 | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), % | ARR=16,6% |

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| <i>№ n/n</i> | <i>Потреба, що формує ринок</i> | <i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i> | <i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i> | <i>Вимоги споживачів до товару</i> |
|------------------|---|---|---|--|
| 1. | Споживач, що має бажання економії власні кошти, шляхом купівлі, або самостійного виготовлення електромобіля | Будь-який споживач, що хоче у свою власність електромобіль. | Цільова група не має обмежень, окрім наявності необхідних коштів, які необхідно буде затратити. | Продукт має справно працювати, та не приносити зайвих витрат, крім запланованих.. Компанія має забезпечити відповідну технічну підтримку. |

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

| <i>№ n/n</i> | <i>Фактор</i> | <i>Зміст загрози</i> | <i>Можлива реакція компанії</i> |
|------------------|---|---|---|
| 1. | Конкуренція | Наявність компаній монополістів на ринку | Розширення рекламної кампанії як товар вітчизняного виробника. |
| 2. | Недостатність потужностей для серійного випуску продукції | Висока вартість виготовлення виробу, відсутність необхідного обладнання для виробництва | Знаходження більш дешевших технологій, і розробка нових технологічних операцій, або залучення додаткових потужностей. |

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

| <i>№ n/n</i> | <i>Фактор</i> | <i>Зміст можливості</i> | <i>Можлива реакція компанії</i> |
|------------------|---|---|---|
| 1. | Збільшення попиту на продукцію. | Бажання багатьох покупців придбати товар. | Розширення виробничих потужностей або знаходження виробничих потужностей за кордоном. |
| 2. | Збільшення якості та усунення недоліків, які були помічені покупцем | Бажання компанії рухатись в правильному напрямку. | Кооперація з існуючими компаніями. |

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| <i>Особливості конкурентного середовища</i> | <i>В чому проявляється дана характеристика</i> | <i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i> |
|--|--|---|
| 1. Тип конкуренції олігополія | Існує 3 великих основних компаній | Поступове входження на ринок, малий відсоток проданої продукції. Необхідність рекламної компанії. |
| 2. Рівень конкурентної боротьби національна | Компанія націлена на українського споживача | Оскільки компанія працює на вітчизняного покупця, то ніяких проблем не повинно виникнути. |
| 3. За галузевою ознакою - міжгалузева | Конкуренти можуть запропонувати велику кількість різноманітних інших транспортних засобів. | Можлива розробка інших проектів, для виготовлення більш широкого асортименту продукції. |
| 4. Конкуренція за видами товарів товарно-родова | Види товарів конкурентів є різними, оскільки використовуються різні технології і процеси. | При таких самих можливостях і функціях реалізований електромобіль має низьку собівартість |
| 5. За характером конкурентних переваг цінова | Вдосконалення існуючих технологій і інших матеріалів для виробництва | Використання технологічних операцій, з метою зменшення собівартості |

| | | |
|-----------------------------|--|--|
| 6. За інтенсивністю марочна | Конкуренти являються відомими брендами в цій сфері | Створення власної фірми та використання активної рекламної кампанія. Надання певних знижок та збільшення гарантійного терміну. |
|-----------------------------|--|--|

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| Складові аналізу | Прямі конкуренти в галузі | Потенційні конкуренти | Постачальники | Клієнти | Товари-замінники |
|------------------|---|---|--|---|---|
| | Навести перелік прямих конкурентів | Визначити бар'єри входження в ринок | Визначити фактори сили постачальників | Визначити фактори сили споживачів | Фактори загроз з боку замінників |
| Висновки: | На ринку існує 3 конкурента. Кожен з конкурентів пропонує транспортні засоби, але кожен з них має свої особливості, а також переваги і недоліки | Можливість входу в ринок є. В залежності від потреб покупців конкурента-ми можуть бути всі 3 компанії | Постачальники відсутні. Компанія напругу узгоджує з покупцем умови закупівлі та поставки | Клієнти диктують необхідні технічні та цінові характеристик продуктів та обирають надійні та відомі марки | Товари замінники можуть бути замінені запропонованим електроомобілем з кращими технічними характеристиками і якістю |

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| <i>№ n/n</i> | <i>Фактор конкурентоспроможності</i> | <i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i> |
|------------------|---|--|
| 1. | Можливість збільшення запасу ходу, та покращення деяких характеристик транспортного засобу. | Це робить товар для користувачів привабливим, і з такими характеристиками, яких немає в інших. |
| 2. | Мала собівартість | Це робить товар для покупців привабливим, оскільки, вже можливо задуматись над більш дешевою продукцією. |

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін
«Електромеханічної системи малогабаритного електромобіля »

| <i>№ n/ n</i> | <i>Фактор конкурентоспроможності</i> | <i>Бали 1-20</i> | <i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з запропонованим проектом</i> | | | | | | |
|-----------------------|--|----------------------|---|----|----|---|----|----|----|
| | | | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1 | Низька собівартість | 15 | | + | | | | | |
| 2 | Можливість апгрейду | 20 | + | | | | | | |

Таблиця 5.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

| | |
|---|---|
| Сильні сторони: низька собівартість, можливість апгрейду | Слабкі сторони: комфортність всередині транспортного засобу, та наявність різних девайсів |
| Можливості: збільшення якості виробу та можлива розробка інших проектів, для виготовлення більш широкого асортименту продукції. | Загрози: конкуренція, втрата можливих клієнтів в наслідок здороження компонентів для випробу. |

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

| <i>№ п/п</i> | <i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i> | <i>Ймовірність отримання ресурсів</i> | <i>Строки реалізації</i> |
|------------------|--|---|------------------------------|
| 1. | Виготовлення готових комплектів для самостійного створення транспортного засобу з використанням простих і доступних елементів. Та виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів – це є про просте і вже доступне рішення. | 85% | 2 місяці |
| 2. | Розробка технічної документації, завдання виробництва та готового проекту для заводського виготовлення готових комплектів та електромобілів | 50% | 6 місяців |

Виходячи з аналізу ринкової можливості запуску проекту, робиться висновок, що альтернатива №1 є більш привабливою, оскільки строки реалізації менші і отримання ресурсів ймовірніші. Хоча альтернатива №2 є також досить привабливою, але свої плоди вона почне приносити значно пізніше, і ймовірність отримання ресурсів є меншим і туманними

Результати розроблення ринкової стратегії проекту представлені в Таблиця 5.14 - Таблиця 5.17.

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

| <i>№ п/ п</i> | <i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i> | <i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i> | <i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i> | <i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i> | <i>Простота входу у сегмент</i> |
|---|---|---|---|--|--|
| 1. | Для індивідуальн ого користуванн я | Можливе виникнення зауважень щодо функціональ них можливостей та комфортност і транспортно го засобу | Користувачі будуть зацікавлені в подібній системі для зменшення грошових витрат порівняно з іншими аналогами. Та економії на | Існують 3 конкуренти. Але їх запропонова на продукція є більш дорогою, та складнішою в експлуатації, хоча має гарні | При вході у сегмент можуть виникнут и проблем и через рекламац ію продукту , та |
| 2. | Для комерційног о використанн я | Дешевизна готової продукції, а також її велика кількість зацікавить великих споживачів | паливі, при використанні електроенергії. А також малогабаритн ість є позитивним показником для даного транспортног о засобу. | технічні характерист ики. | невідоміс ть фірми |
| Які цільові групи обрано: обрано основну цільову групу – індивідуального споживача, оскільки для них питання економії фінансів на | | | | | |

транспортному засобі є більш пріоритетні. і додаткову – підприємства, якщо їх потреби будуть забезпечуватися, і вони будуть співпрацювати з фірмою яка має малий стаж роботи на ринку.

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

| <i>№ п/ п</i> | <i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i> | <i>Стратегія охоплення ринку</i> | <i>Ключові конкурентоспро- можні позиції відповідно до обраної альтернативи</i> | <i>Базова стратегія розвитку</i> |
|-----------------------|--|--|---|--|
| 1. | Виготовлення готових комплектів для самостійного створення транспортного засобу з використанням простих і доступних елементів. Та виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів – це є про просте і вже доступне рішення. | Масовий маркетинг | Зроби самостійно свій власний електромобіль, малогабаритний електромобіль | Стратегія диференціації |

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| <i>№ п/п</i> | <i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i> | <i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i> | <i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i> | <i>Стратегія конкурентної поведінки</i> |
|------------------|---|---|--|---|
| 1. | Так | Шукати нових споживачів | Так, введення можливості розширення асортименту транспортних засобів | Стратегія наслідування лідеру |

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

| <i>№ п/ п</i> | <i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i> | <i>Базова стратегія розвитку</i> | <i>Ключові конкурентоспромо жні позиції власного стартап- проекту</i> | <i>Вибір асоціацій, які мають сформува ти комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i> |
|-----------------------|---|--|--|--|
| 1. | Забезпечення дешевої транспортної засоби, та дешевої самого палива для нього. | Стратегія диференціації | Власний електромобіль з використанням готових комплектів, свій власний малогабаритний електромобіль. | Зроби самостійно свій власний електромобіль, малогабаритний електромобіль ідеальний для нашого міста |

Розроблення маркетингової програми стартап-проекту наведено у
Таблиця 5.18 - Таблиця 5.22..

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| <i>№ п/п</i> | <i>Потреба</i> | <i>Вигода, яку пропонує товар</i> | <i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i> |
|------------------|--|--|---|
| 1. | Готовий комплект електромеханічної системи для встановлення (переобладнання) на транспортний засіб | Можливість досить дешево переобладнати (зробити) свій транспортний засіб в електромобіль | Рішення підходить для будь якого транспортного засобу |
| 2. | Готовий малогабаритний електромобіль | Готовий транспортний засіб, в який сів і поїхав. | Електромобіль є малогабаритним, і ідеально підходить для пересування в щільному потоці машин. |

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

| <i>Рівні товару</i> | <i>Сутність та складові</i> | | |
|---------------------------------|--|------|-------------------|
| I. Товар за задумом | Продукція компанії дає можливість кожному бажаючому зібрати свій власний електромобіль (переобладнати в електромобіль) використовуючи готовий комплект електромеханічної системи і тд.. Або придбати готовий малогабаритний електромобіль. | | |
| II. Товар у реальному виконанні | Властивості/характеристики | М/Нм | Вр/Тх /Тл/Е/Ор |
| | 1. Можна переобладнати будь який транспортний засіб в електромобіль; 2. Має великий запас ходу; | - | - |

| | | | |
|--|---|--|--|
| | 3. Простота, легкість і малогабаритність електромобіля; 4. Низька вартість. | | |
| | Тестування при налаштуванні та випробування проводитимуться або на заводі для готового електромобіля; або індивідуальним власником готового комплекту, за допомогою спеціального ПЗ. | | |
| | Маркування присутнє | | |
| | Запропонований проект. Малогабаритний електромобіль; Комплект для переобладнання в електромобіль. | | |
| III. Товар із підкріпленням | Програмування і наладка перед продажем | | |
| | Технічна підтримка проданого товару спеціалістами | | |
| За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: ноу-хау. | | | |

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

| <i>№ п/п</i> | <i>Рівень цін на товари- замінники</i> | <i>Рівень цін на товари- аналоги</i> | <i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i> | <i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i> |
|------------------|--|--|---|--|
| 1. | 300000 | 500000 | 1000000 | 110000 |

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

| <i>№ п/п</i> | <i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i> | <i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i> | <i>Глибина каналу збуту</i> | <i>Оптимальна система збуту</i> |
|------------------|---|--|---|---|
| 1. | Купують транспортний засіб та платять за ремонт обладнання, у разі поломки | Продаж | 1 – напряму, 1 – через одного посередника | Власна та залучена |

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

| <i>№ п/п</i> | <i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i> | <i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i> | <i>Ключові позиції, обрані для позиціонуван ня</i> | <i>Завдання рекламного повідомлен ня</i> | <i>Концепція рекламного звернення</i> |
|------------------|--|---|--|--|---|
| 1. | Купівля продукції компанії для встановлення на транспортний засіб. Транспортний засіб використовується для пересування пасажирів | Живе спілкування, Інтернет | Власний електромобіль з використанням готових комплектів, або свій власний малогабаритний електромобіль. | Показати переваги розробленої електромеханічної системи малогабаритного електромобіля у тому числі і в порівнянні з конкурентами | Реклама в мережі Інтернет, живе спілкування із потенційними клієнтами, участь у тематичних виставках для залучення зацікавлених покупців. |

Висновок по розділу

У даному розділі був розроблений стартап-проект по продажу, впровадженні в масове використання електромеханічної системи малогабаритного електромобіля. Були проведені технологічний аудит ідеї, аналіз ринкових можливостей запуску проекту та розроблено ринкову стратегію.

Проведені дослідження показують, що зазначений продукт має можливості для впровадження на ринку України. Обрана технологія реалізації

ідеї проекту: виготовлення готових комплектів з використанням простих і доступних елементів чи виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів, оскільки такі технології є доступними, та при певних напруженнях можуть виконуватися в проекті. Виходячи з аналізу ринкової можливості запуску проекту можна зробити висновок, що виготовлення готових комплектів для самостійного створення транспортного засобу з використанням простих і доступних елементів, та виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів – це є просте і вже доступне рішення (альтернатива №1). Оскільки строки реалізації менші і отримання ресурсів ймовірніший. Хоча розробка технічної документації, завдання виробництва та готового проекту для заводського виготовлення готових комплектів та електромобілів є також досить привабливою перспективою, але свої плоди вона почне приносити значно пізніше, і ймовірність отримання ресурсів є меншим і туманними (альтернатива №2).

Як основну цільову групу споживачів обрано – індивідуального споживача, оскільки для них питання економії фінансів на транспортному засобі є більш пріоритетні. А підприємства, як додаткову групу, якщо їх потреби будуть забезпечуватися, і вони будуть співпрацювати з фірмою яка має малий стаж роботи на ринку.

Бар'єрами для входу на ринок можуть бути компанії-конкуренти, оскільки вони вже відомі. Але, виходячи з того що стартап-проект є ноу-хау у цій сфері, то певний час товар буде захищений від копіювання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації розглянуто приклад повного циклу розробки та виготовлення електромеханічної системи малогабаритного електромобіля. При цьому отримано наступні основні результати:

1. На основі аналітичного огляду існуючих моделей електромобілів сформульовано технічне завдання на роботу, що дозволить створити малогабаритний електромобіль для виконання наукових досліджень.
2. Розроблено ескізу шасі майбутнього електромобіля, просте креслення конструкції рами, і основних вузлів, для створення механічної частини з урахуванням мінімального бюджету, визначено його габаритні розміри та експлуатаційні характеристики – перевезення двох пасажирів (150 кг корисного навантаження), прискорення 1м/с і швидкість 10 м/с.
3. На основі креслень проведено слюсарні і зварювальні роботи, в результаті чого було виготовлено конструкцію шасі, на яку може бути змонтована електромеханічна система (двигун, передаточний механізм, перетворювач, контролер і АКБ).
4. Розроблено та виготовлено електричну частину електромеханічної системи, яка включає в себе силову частину перетворювача, керуючий контролер, комутаційну апаратуру. Виконано налаштування і програмування контролера, моделювання перехідних процесів двигуна, і тестові випробування отриманої системи.
5. Виконано випробування розробленого електромобіля при русі по прямій поверхні.

За результатами проведеної роботи можна зробити висновки, що реалізація даного проекту є досить перспективним напрямом в розвитку електромеханічних систем електромобілів. Розроблений електромобіль можна використовувати, як стенд для майбутніх випробувань електромеханічних систем, або удосконалення існуючої. Також даний проект є наглядною

ілюстрацією дешевизни пересування на електромобілі, економічності і простоти конструкції електромобілів.

Розроблений транспортний засіб потребує подальшого вдосконалення в частині: забезпечення рекуперації, електродинамічного гальмування, переходу на двигуни змінного струму.

Розроблений дослідний електромобіль при відповідному доопрацюванні дозволить досліджувати:

1. Процеси керування приводними тяговими електродвигунами.
2. Процеси керування «електричним диференціалом».
3. Електромеханічні системи для рульового управління.
4. Системи автопілота.

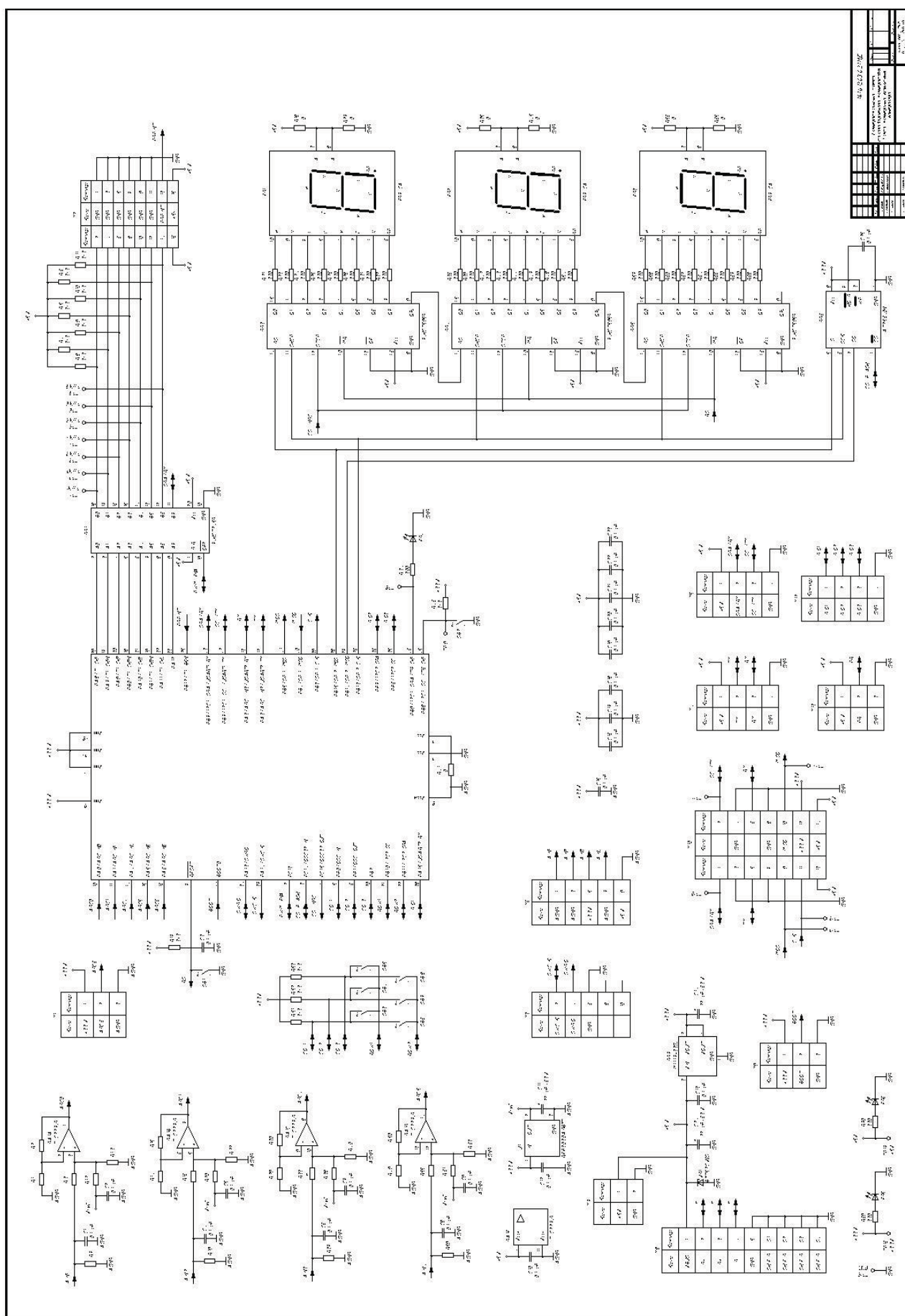
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Визначення електромобіля та історія його розвитку. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D1%8C> (дата завершення 16.12.2020).
2. Класифікація електромобілів URL: http://sdisle.com/%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D0%B5%D0%B9 (дата завершення 16.12.2020).
3. Типи електромобілів, класифікація на основні групи URL: <https://www.energuide.be/en/questions-answers/what-different-types-of-electric-car-are-available/196/> (дата завершення 16.12.2020).
4. Принципи роботи автомобілів з різними типами силових установок і видами силових URL: https://www.leadingthecharge.org.nz/nz_electric_car_guide (дата завершення 16.12.2020).
5. Типи електромобілів, коротке керівництво по роботі URL: <https://www.ezoomed.com/blog/buy-new/types-electric-vehicles/> (дата завершення 16.12.2020).
6. Типи електромобілів, яскраві представники модельного ряду URL: <https://www.evgo.com/why-evs/types-of-electric-vehicles/> (дата завершення 16.12.2020).
7. Електромобіль. Види і принцип дії. Робота і застосування URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/elektromobil/> (дата завершення 16.12.2020).
8. Які найдешевші електромобілі доступні сьогодні на ринку URL: <https://ecotechnica.com.ua/transport/3185-kakie-samye-deshevye-elektromobili-dostupny-segodnya-na-rynke.html> (дата завершення 16.12.2020).

9. Огляд найпопулярніших електромобілів світу
<https://elcars.com.ua/samyiy-polnyiy-obzor-elektromobiley-mira/> (дата
 завершення 16.12.2020).
10. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design/Mehrdad Ehsani ... [et al.]. 2005 by CRC Press LLC.
11. «Теорія електропривода-1» курс лекцій з кредитного модуля для студентів денної форми навчання напряму підготовки 6.050702-«Електромеханіка» спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» / Уклад. М.Я. Островерхов. –К.: НТУУ «КПІ», 2010.–274 с.
12. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ “КПІ”, 2011 р. –96 с.
13. Розрахунок ємності акумуляторних батарей URL:
https://avtonom.com.ua/stati/towari_akkumuljatornie_batarei/akkumuljatoridlyaibp/raschet-emkosti (дата завершення 16.12.2020).
14. Розрахунок ємності АКБ і основні поняття URL: <https://www.a-trade.com.ua/text-obzor/raschet-emkosti-akb-i-osnovnye-ponyatiya/> (дата завершення 16.12.2020).
15. Расчёт суперконденсаторов ё-мобиля URL:
<http://altinfoyg.ru/rashot/rashotidei/raschjot-superkondensatorov-jo-mobilya.html>
 (дата завершення 16.12.2020).
16. Н.И. Слипченек, В.А. Письмецкий, М.Ю. Гуртовой
 «Исследование режимов работы акб и суперконденсатора в системе энергообеспечения электромобиля» *Восточно-Европейський журнал передових технологій* 2012.
17. Самодельный электромобиль — всё не так, как думаешь URL:
<https://habr.com/ru/post/473708/> (дата завершення 16.12.2020).

18. Ковбаса С.М., к.т.н.; Приступа Д.Л., Воронко А.Б., магістранти «розробка функціональної схеми лабораторного стенду для дослідження електромеханічних систем на основі двигуна постійного струму з незалежним збудженням», *Сучасні проблеми електроенерготики та автоматики*. – Київ: ФЕА «КПІ ім. Ігоря
19. Ковбаса С.М., Приступа Д.Л., Воронко А.Б., «Результати експериментального тестування алгоритму регулювання швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням», *Сучасні проблеми електроенерготики та автоматики*. – Київ: ФЕА «КПІ ім. Ігоря
20. IGBT/MOSFET Gate Drive Optocoupler. Application Note 91. / VISHAY SEMICONDUCTORS. –2011.
21. Driving IGBT Modules. Application Note. Powerex. –2009.
22. Веб сайт. URL <https://imrad.com.ua/> (дата звернення 16.12.2020).
23. Ковбаса С.М., доц.; Онанко А.Ю. магістрант «Бездавачеве керування кутовою швидкістю електро-двигуна постійного струму», *Сучасні проблеми електроенерготики та автоматики*. – Київ: ФЕА «КПІ ім. Ігоря
24. Дипломне проектування бакалаврів та магістрів URL: <https://epa.kpi.ua/study/graduation-work/> (дата звернення 16.12.2020).

ДОДАТОК 1



ДОДАТОК 4

[illegible]

ДОДАТОК 5

